

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Vedran Nikl

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Sanjin Mahović, dipl. ing.

Student:

Vedran Nikl

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Sanjinu Mahoviću na ukazanom povjerenju te savjetima i uputama prilikom izrade ovog rada. Također se zahvaljujem dr. sc. Gorani Baršić na savjetima i uputama prilikom izrade ovog rada.

Posebna zahvala ide mojoj obitelji koja mi je tijekom cijelog života bila izuzetna podrška i bez kojih moj uspjeh ne bi bio moguć, zbog čega im je ovaj rad posvećen.

Vedran Nikl



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
 Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
 proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
 materijala i mehatronika i robotika



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **VEDRAN NIKL** Mat. br.: 0035160596

Naslov rada na hrvatskom jeziku: ANALIZA KOREKCIJE REZULTATA MJERENJA DUBINE BRAZDE NA INTERFEROMETRIJSKOM MIKROSKOPU EPIVAL-INTERPHAKO

Naslov rada na engleskom jeziku: CORRECTION ANALYSIS OF GROOVE DEPTH MEASUREMENT RESULTS ON INTERFEROMETRICAL MICROSCOPE EPIVAL-INTERPHAKO

Opis zadatka:

1. Opisati sustav rada Laboratorija za precizna mjerenja dužina (LFSB) na području ispitivanja tekture površina. Detaljno opisati konstrukcijske karakteristike i mjeriteljske značajke interferometrijskog mikroskopa Epival-Interphako.
2. Na odabranim etalonima različitih nazivnih dubina brazdi provesti mjerenje dubine brazde na interferometrijskom mikroskopu Epival-Interphako koristeći različite izvore svjetlosti. Provesti analizu rezultata mjerenja.
3. Temeljem rezultata provedene analize definirati faktore korekcije rezultata mjerenja dubina brazdi s obzirom na korišteni izvor svjetlosti.

U radu koristiti iskustva i materijale Laboratorija za precizna mjerenja dužina FSB-a, te navesti eventualnu pomoć


Zadatak zadan:
 14. ožujka 2013.

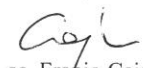
Rok predaje rada:
 16. svibnja 2013.

Predviđeni datum obrane:
 22. - 24. svibnja 2013.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:


 Prof. dr. sc. Sanjin Mahović


 Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	VII
POPIS OZNAKA	X
SAŽETAK.....	XI
1. UVOD.....	1
2. VALOVI SVJETLOSTI	2
2.1. Općenito o valovima	2
2.2. Laserski izvor svjetlosti	3
3. INTERFERENCIJA VALOVA	5
3.1. Interferencija svjetlosti.....	6
3.2. Youngov pokus	7
4. Interferometrijski mikroskop Epival - Interphako	10
4.1. Epival - Interphako.....	11
4.2. Interferencijska metoda mjerenja dubine brazde d	11
5. Shearing postupak.....	13
6. MJERNA NESIGURNOST U POSTUPKU UMJERAVANJA DUBINE BRAZDE INTERFEROMETRIJSKOM METODOM	16
6.1. Modifikacija interferometrijskog mikroskopa Epival-Interphako	16
6.2. Proračun mjerne nesigurnosti metodama GUM i MCS	19
6.3. Proračun mjerne nesigurnosti u postupku umjeravanja dubine brazde interferometrijskom metodom	21
6.3.1. Matematički model	21
6.3.2. Nesigurnost mjerenja dubine brazde metodom pravih razlomaka $u(d_{fit})$	22
6.3.2.1. Standardna nesigurnost mjerenja pravih razlomaka $u(Fr)$	23
6.3.2.2. Standardna nesigurnost mjerenja valne duljine izvora svjetlosti $u_c(\lambda)$	23
6.3.2.3. Standardna nesigurnost indeksa loma zraka $u(n)$	23
6.3.2.4. Sastavljena standardna nesigurnost metode mjerenja pravih razlomaka $u_c(d_{fit})$	23
6.3.3. Nesigurnost uslijed utjecaja geometrije brazde $u(\delta Lf)$	24
6.3.4. Nesigurnost uslijed utjecaja aperture $u(\delta L\Omega)$	24
6.3.5. Standardna nesigurnost ponovljivosti očitavanja korištenog softvera za analizu interferograma $u(\delta Lf)$	24
6.3.6. Sastavljena standardna nesigurnost $u_c(d)$	24
6.3.7. Proračun mjerne nesigurnosti primjenom MCS	25
7. Analiza korekcije rezultata mjerenja dubine brazde na interferometrijskom mikroskopu Epival-Interphako	29
7.1. Ostvareni rezultati mjerenja dubine brazde d	37
7.1.1. Faktori korekcije	51

7.2. Utvrđivanje razlika u izmjerenim vrijednostima B	57
7.3. Analiza interferograma po sekcijama	62
8. ZAKLJUČAK.....	75
9. LITERATURA	76
10. PRILOZI.....	77

POPIS SLIKA

Slika 1. Shema elektromagnetnog spektra s oznakama valnih duljina, frekvencija i energija ..	2
Slika 2. Primjer nekoherentne (obična lampa) i koherentne (laser) svjetlosti	3
Slika 3. Konstruktivna i destruktivna interferencija valova	5
Slika 4. Sinusoidni val.....	6
Slika 5. Youngove interferencije svjetlosti pomoću dvije pukotine.	7
Slika 6. Uvjet koherencije	8
Slika 7. Optička shema mikroskopa Epival – Interphako [3]	10
Slika 8. Epival – Interphako [4]	11
Slika 9. Prikaz dvostruko poprečno zamaknute slike brazde nakon razdvajanja Shearingovom metodom.....	13
Slika 10. Pruge interferencije	15
Slika 11. Prikaz dvostruko poprečno zamaknute slike brazde nakon razdvajanja Shearingovom metodom [2]	16
Slika 12. Interferogram snimljen na mikroskopu Epival-Interphako [2]	17
Slika 13. Interferogram snimljen na modificiranom mikroskopu [2]	18
Slika 14. Interferogram sa srednjim linijama ucrtanim softverom.....	19
Slika 15. Monte Carlo simulacija mjernog sustava [2]	21
Slika 16. Funkcije gustoće vjerojatnosti $g(d)$ za etalon nazivne dubine brazde 20 nm [2].....	27
Slika 17. Funkcije gustoće vjerojatnosti $g(d)$ za etalon nazivne dubine brazde 50 nm [2].....	27
Slika 18. 0-17 halogena lampa	29
Slika 19. 0-19 halogena lampa	29
Slika 20. 0-21 halogena lampa	30
Slika 21. 0-24 halogena lampa	30
Slika 22. G1 halogena lampa.....	30

Slika 23. G2 halogena lampa.....	30
Slika 24. Crvena boja 0-6.....	30
Slika 25. Crvena boja 0-8.....	30
Slika 26. Crvena boja 0-17	31
Slika 27. Crvena boja 0-19	31
Slika 28. Crvena boja 0-21	31
Slika 29. Crvena boja 0-24.....	31
Slika 30. Crvena boja G1	31
Slika 31. Crvena boja G2	31
Slika 32. 0-6 Renishaw laser	32
Slika 33. 0-8 Renishaw laser	32
Slika 34. 0-17 Renishaw laser	32
Slika 35. 0-19 Renishaw laser	32
Slika 36. 0-21 Renishaw laser	32
Slika 37. 0-24 Renishaw laser	32
Slika 38. 0-6 Zelena boja.....	33
Slika 39. 0-8 Zelena boja.....	33
Slika 40. 0-17 Zelena boja.....	33
Slika 41. 0-19 Zelena boja.....	33
Slika 42. 0-21 Zelena boja.....	33
Slika 43. 0-24 Zelena boja.....	33
Slika 44. G1 Zelena boja	34
Slika 45. G2 Zelena boja	34
Slika 46. 0-6 Žuta boja	34
Slika 47. 0-8 Žuta boja	34

Slika 48. 0-17 Žuta boja	34
Slika 49. 0-19 Žuta boja	34
Slika 50. 0-24 Žuta boja	35
Slika 51. G1 Žuta boja.....	35
Slika 52. G2 Žuta boja.....	35
Slika 53. Program za analizu slike - početna	36
Slika 54. Program za analizu slike	36
Slika 55. Prikaz brazde i okoline.....	37
Slika 56. Graf halogena lampa i koeficijent smjera	52
Slika 57. Graf- crvena i koeficijent smjera	53
Slika 58. Graf renishaw laser i koeficijent smjera	54
Slika 59. Graf zelena boja i koeficijent smjera	55
Slika 60. Graf žuta i koeficijent smjera.....	56
Slika 61. Etalon 0-8 (žuta) sa proizvoljno označenim crtama.....	57
Slika 62. Etalon 0-24 (žuta boja) sa proizvoljno označenim crtama.....	58
Slika 63. Etalon 0-24 (zelena boja) sa proizvoljno označenim crtama	58
Slika 64. 0-8 zelena boja - okolina.....	59
Slika 65. 0-8 zelena boja - brazda	59
Slika 66. 0-8 zelena boja - okolina 1	59
Slika 67. Etalon 0-6 - izvor svjetlosti crvena boja	62
Slika 68. Etalon 0-8 - izvor svjetlosti crvena boja	63
Slika 69. Etalon 0-24 - izvor svjetlosti crvena boja	63
Slika 70. Etalon 0-6 - izvor svjetlosti renishaw laser	64
Slika 71. Etalon 0-8 - izvor svjetlosti renishaw laser	64
Slika 72. Etalon 0-24 - izvor svjetlosti renishaw	65

Slika 73. Etalon 0-6 - izvor svjetlosti zelena boja.....	65
Slika 74. Etalon 0-8 - izvor svjetlosti zelena boja.....	66
Slika 75. Etalon 0-24 - izvor svjetlosti zelena boja.....	66
Slika 76. Etalon 0-6 - izvor svjetlosti žuta boja	67
Slika 77. Etalon 0-8 - izvor svjetlosti žuta boja	67
Slika 78. Etalon 0-24 - izvor svjetlosti žuta boja	68
Slika 79. Graf zelena boja	71
Slika 80. Prikaz interferograma po sekcijama - zelena boja	71
Slika 81. Graf žuta boja.....	72
Slika 82. Prikaz interferograma po sekcijama - žuta boja.....	72
Slika 83. Graf crvena boja.....	73
Slika 84. Prikaz interferograma po sekcijama – crvena boja	73
Slika 85. Graf renishaw laser	74
Slika 86. Prikaz interferograma po sekcijama - renishaw laser	74

POPIS TABLICA

Tablica 1. Sastavnice standardne nesigurnosti u postupku umjeravanja dubine brazde interferencijskom metodom [2]	25
Tablica 2. Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine d za etalon nazivne dubine brazde d = 20 nm [2]	26
Tablica 3. Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine d za etalon nazivne dubine brazde d = 50 nm [2]	26
Tablica 4. Zadani etaloni [1]	29
Tablica 5. Različiti izvori svjetlosti.....	29
Tablica 6. Crvena boja 0-6 rezultati	38
Tablica 7. Crvena boja 0-8 rezultati	38
Tablica 8. Crvena boja 0-17 rezultati	39
Tablica 9. Crvena boja 0-19 rezultati	39
Tablica 10. Crvena boja 0-21 rezultati	40
Tablica 11. Crvena boja 0-21 rezultati	40
Tablica 12. Crvena boja 0-24 rezultati	41
Tablica 13. Crvena boja G1 rezultati	41
Tablica 14. Crvena boja G2 - rezultati	42
Tablica 15. Renishaw laser 0-6 rezultati	42
Tablica 16. Renishaw laser 0-8 rezultati	43
Tablica 17. Renishaw laser 0-17 rezultati	43
Tablica 18. Renishaw laser 0-19 rezultati	44
Tablica 19. Renishaw laser 0-21 rezultati	44
Tablica 20. Renishaw laser 0-24 rezultati	45
Tablica 21. Zelena boja 0-6 rezultati.....	45
Tablica 22. Zelena boja 0-8 rezultati.....	46

Tablica 23. Zelena boja 0-17 rezultati.....	46
Tablica 24. Zelena boja 0-19 rezultati.....	47
Tablica 25. Zelena boja 0-21 rezultati.....	47
Tablica 26. Zelena boja G2 rezultati	48
Tablica 27. Žuta boja 0-6 rezultati	48
Tablica 28. Žuta boja 0-17 rezultati	49
Tablica 29. Žuta boja 0-19 rezultati	49
Tablica 30. Žuta boja 0-21 rezultati	50
Tablica 31. Žuta boja G1 rezultati.....	50
Tablica 32. Žuta boja G2 rezultati.....	51
Tablica 33. Halogena lampa - referentne, izmjerene i korigirane vrijednosti dubine brazde ..	52
Tablica 34. Crvena boja - referentne, izmjerene i korigirane vrijednosti dubine brazde	53
Tablica 35. Renishaw laser - referentne, izmjerene i korigirane vrijednosti dubine brazde	54
Tablica 36. Zelena boja - referentne, izmjerene i korigirane vrijednosti dubine brazde.....	55
Tablica 37. Žuta boja - referentne, izmjerene i korigirane vrijednosti dubine brazde	56
Tablica 38. Crvena boja 0-6 - odnos B i s	60
Tablica 39. Crvena boja 0-8 - odnos B i s	60
Tablica 40. Crvena boja 0-24 - odnos B i s	60
Tablica 41. Renishaw laser 0-6 - odnos B i s	60
Tablica 42. Renishaw laser 0-8 - odnos B i s	60
Tablica 43. Renishaw laser 0-24- odnos B i s	60
Tablica 44. Zelena boja 0-6 - odnos B i s	61
Tablica 45. Zelena boja 0-8 - odnos B i s	61
Tablica 46. Zelena boja 0-24 - odnos B i s	61
Tablica 47. Žuta boja 0-6 - odnos B i s	61

Tablica 48. Žuta boja 0-8 - odnos B i s	61
Tablica 49. Žuta boja 0-24 - odnos B i s	61
Tablica 50. Vrijednosti A za zeleni izvor svjetlosti.....	68
Tablica 51. Vrijednosti A za žuti izvor svjetlosti	69
Tablica 52. Vrijednosti A za crveni izvor svjetlosti	69
Tablica 53. Vrijednosti A za renishaw izvor svjetlosti.....	70

POPIS OZNAKA

I - primarni izvor svjetlosti

I_1, I_2 - pukotine koje se ponašaju kao izvori dvaju koherentni elektromagnetskih valova

V_1, V_2, V_3 - zastori

G - razmak između zastora V_2 i V_3

p - razmak između sredina pukotina I_1 i I_2

r_1, r_2 - geometrijski put zraka 1 i 2

B - razmak između dviju susjednih svijetlih (tamnih) pruga

γ - kut između zrake i okomice na ravninu

λ_s – valna duljina korištene svjetlosti

Δ - razlika optičkih putova

c_1 i c_2 – očitavanja na skali mjernog kompenzatora

Q – faktor skale

k - faktor pokrivanja

P - vjerojatnost

U - proširena mjerna nesigurnost

d - dubina brazde

κ - cijeli broj pruga interferencije

F_r - pravi razlomak, tj. dio cijele pruge interferencije

λ - valna duljina korištenog izvora svjetlosti

n - indeks loma zraka

δL_f - utjecaj geometrije brazde

δL_Ω - utjecaj aperture

δL_s - ponovljivost očitavanja

SAŽETAK

U ovom radu provedena je analiza rezultata mjerenja dubine brazde na interferometrijskom mikroskopu Epival - Interphako. U prvom dijelu rada opisan je sustav rada Laboratorija za precizna mjerenja dužina (LFSB) na području ispitavanja tekture površina. Detaljno se opisalo konstrukcijske karakteristike i mjeriteljske značajke interferometrijskog mikroskopa Epival-Interphako. U daljnjem tekstu se na odabranim etalonima različitih nazivnih dubina brazdi provelo mjerenje dubine brazde na interferometrijskom mikroskopu Epival-Interphako koristeći različite izvore svjetlosti te se provela analiza rezultata mjerenja. Temeljem rezultata provedene analize, definirani su faktori korekcije rezultata mjerenja dubina brazdi s obzirom na korišteni izvor svjetlosti.

1. UVOD

Interferometrijski mikroskopi su uređaji koji služe za precizna mjerenja dužina, odnosno hrapavosti površina. Interferencijom svjetlosti, dva koherentna svjetlosna vala koja su prošla različite optičke puteve, sastavljaju se u rezultirajući val. Interferometrijski mikroskop Epival - Interphako namijenjen je za interferometrijska mjerenja dubina tehničkih površina kao i debljina tankih slojeva što je i primijenjeno u ovom slučaju kod mjerenja dubine brazde. U cilju osiguravanja sljedivosti do definicije valnog metra i smanjenja mjernih nesigurnosti rezultata mjerenja dubine brazde d , u LFSB-u je provedena modifikacija interferencijskog mikroskopa *Epival-Interphako*. Modifikacija se sastojala od primjene CCD kamere *Olympus DP 70* i zamjene originalnog izvora svjetlosti halogene lampe s jedno stabiliziranim helij-neon laserom. Razvijen je i softver za analizu interferograma kojim je riješen problem pozicioniranja srednjih linija na prugama interferencija.

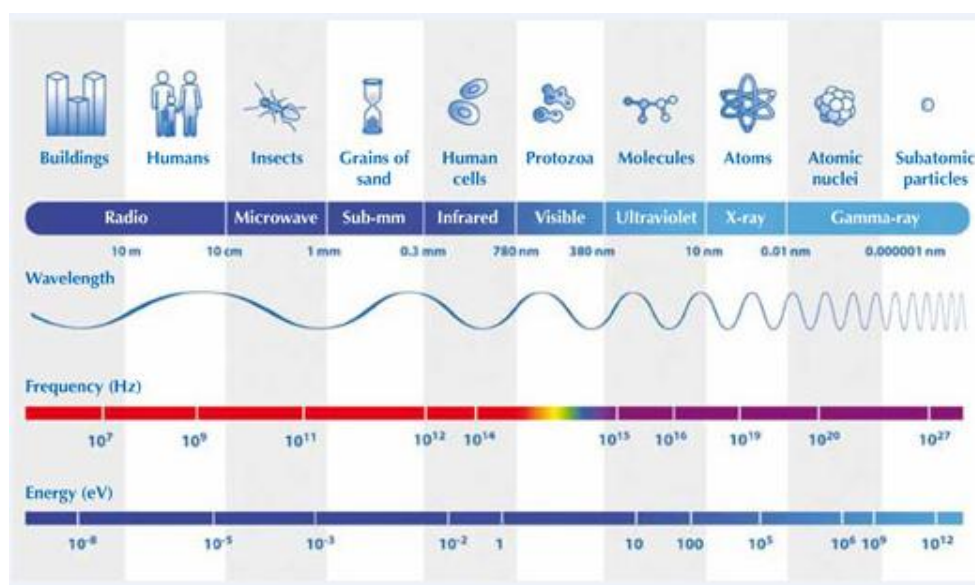
Analizom provedenih rezultata mjerenja definirali su se faktori korekcije rezultata mjerenja dubine brazde s obzirom na korišteni izvor svjetlosti. Dalje je provedena analiza interferograma na način da su analizirane vrijednosti B i s u okolini, brazdi i okolini 1. Također je izvršena analiza interferograma detaljno po sekcijama.

2. VALOVI SVJETLOSTI

2.1. Općenito o valovima

Gibanje valova je pravilno ponavljanje gibanja naprijed-nazad i premještanje s jedne na drugu stranu. To gibanje prikazuje kako se oblici energije kreću kroz prostor. Primjeri gibanja valova su zvuk, titranje vode, radiosignali i svjetlo. U svakom se od ovih gibanja oblik energije prenosi pravilnom izmjenom promjena ili vibracija. Valovi svjetla i radiosignala oblici su elektromagnetske radijacije gdje se energija prenosi oscilacijama u električnom ili magnetskom polju.

Amplituda valova je snaga ili intenzitet vibracije. Valovi vibriraju oko prosječnog položaja koji je nazvan položaj nula amplitude, upravo onako kako valovi vode imaju brijeg i dolinu iznad i ispod razine mirne vode. Povećanje amplitude zvuka ima za posljedicu jačanje zvuka, dok povećanje amplitude svjetla pojačava svjetlo. Frekvencija kretanja vala je broj oscilacija vala dovršenih u jednoj sekundi. Visoka frekvencija zvuka ima viši vrh od niske frekvencije zvuka. Povećanjem frekvencije valova, svjetla boja se mijenja od crvene do ljubičaste boje spektra. Povećanjem frekvencije gibanja vala smanjuje mu se dužina, a to je udaljenost između susjednih točaka najveće amplitude vala.



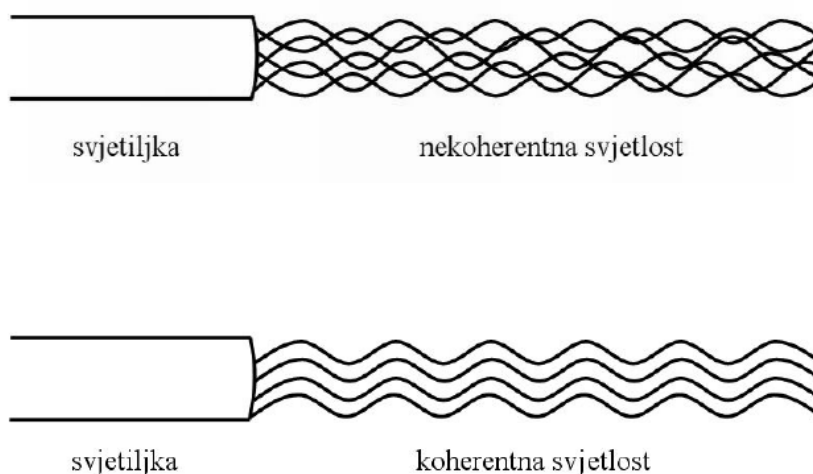
Slika 1. Shema elektromagnetnog spektra s oznakama valnih duljina, frekvencija i energija

Shema elektromagnetskog spektra vidi se na slici 1. Vidljiva svjetlost samo je dio spektra elektromagnetskih valova.. Upravo to je pretpostavio James Clark Maxwell, premda nije

uspio dokazati svoju teoriju. Uskoro su otkrivena i druga zračenja. Postoje mnoge vrste elektromagnetskih zračenja, pri čemu sve putuju brzinom svjetlosti. To su gama zrake, x zrake, ultraljubičasto zračenje, infracrveno zračenje, vidljiva svjetlost, radiovalovi i mikrovalovi, terahertzno zračenje (daleko infracrveno područje). Laseri mogu raditi u području koje se proteže od područja infracrvenog do ekstremno vakuum ultraljubičastog.

2.2. Laserski izvor svjetlosti

Laserske zrake su paralelne te ih jednostavne leće mogu fokusirati. Zbog toga je laser idealan za operacije ili rezanje različitih materijala. Laseri mogu proizvesti svjetlost u vrlo uskom rasponu frekvencija—tako da je samo jedne boje (laserska svjetlost je monokromatska). Također je i koherentna (iste valne duljine). To je omogućeno stimuliranom emisijom. Kad jedan foton stimulira emisiju drugog, novi foton započinje život u istoj fazi kao i onaj koji ga ja stimulirao. Znači dol se podudara s dolom, a brijeg s brijegom, tj. koherentni su. Koherentna duljina lasera ograničena je na nekoliko kilometara.



Slika 2. Primjer nekoherentne (obična lampa) i koherentne (laser) svjetlosti

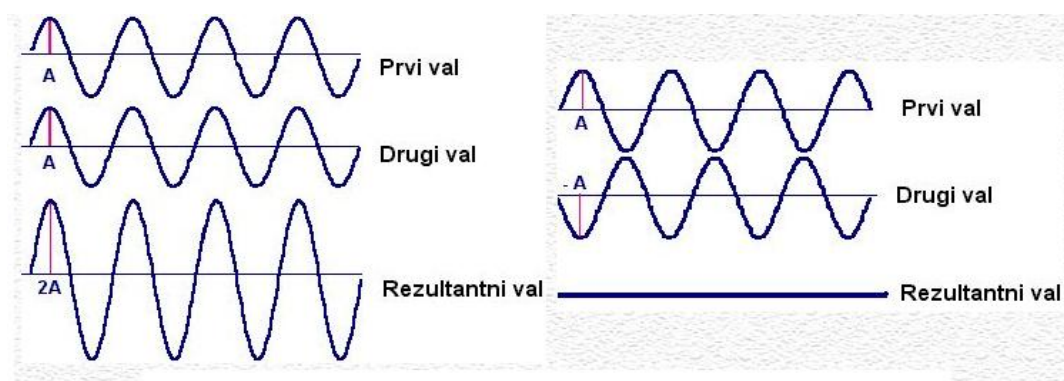
Lasери se dijele s obzirom na prirodu medija koji se koristi za proizvodnju laserske zrake. Stoga postoje: laseri s čvrstom jezgrom, plinski laseri, kemijski laseri, laseri s bojilima i laseri sa slobodnim elektronima.

Danas se primjenjuju u gotovo svim područjima ljudskog djelovanja. Laseri s krutom jezgrom koriste se za rezanje, bušenje i varenje. Laseri se koriste u kirurgiji, zbog velike preciznosti prilikom obrade materijala, npr. u kirurgiji oka, kod liječenja dalekovidnosti i kratkovidnosti. Također, brzina svjetlosti mjeri se pomoću lasera. Koriste se za označavanje položaja.

Pomoću njih je izmjerena udaljenost od Zemlje do Mjeseca s velikom točnošću. Zatim se koriste za pohranu i očitavanje na CD i DVD medijima, u laserskim printerima, spektroskopiji, u vojnoj tehnologiji...

3. INTERFERENCIJA VALOVA

Pojava interferencije svjetlosti primjenjuje se za najpreciznija mjerenja u različitim područjima tehničkih mjerenja. Interferencijom svjetlosti, dva koherentna svjetlosna vala koja su prošla različite optičke puteve, sastavljaju se u rezultirajući val. Rezultat interferencije ovisi o razlici optičkih puteva, amplitudi valova i valnim duljinama, odnosno o frekvenciji valova. Interferencijom valova, u nekim prostornim točkama može se pojačati (konstruktivna interferencija), a u drugima oslabiti (destruktivna interferencija) svjetlosni intenzitet, ovisno o razlici faza.



Slika 3. Konstrukтивna i destruktivna interferencija valova

Interferencije dvaju točkastih izvora nastaju teoretski u čitavom prostoru, no uvjet je koherencija valova. Koherencija valova znači da su valovi iste valne duljine. Postoje dvije vrste koherencije valova: prostorna i vremenska. Prostorna koherencija je korelacija faza valova koji su u isti trenutak emitirani s dva točkasta izvora. Vremenska koherencija je korelacija faza valova koji su u dva različita trenutka emitirani s istog točkastog izvora, odnosno s jedne točke izvora zračenja.

Karakteristika vremenske koherencije je vremenski interval Dt , u kojem izvorna korelacija faza valova ostaje konstanta. Kako valovi mogu prijeći različite optičke puteve, a to znači da se mogu razlikovati i u vremenskom trajanju puta, oni mogu interferirati samo ako vremenska razlika puta na prelazi veličinu vremenske koherencije. Veličina maksimalno dopuštene razlike optičkih puteva, za koju je još moguća interferencija, naziva se duljina koherencije. Duljina koherencije jednaka je umnošku brzine širenja vala i vremenskog intervala Dt . Svjetlost dvaju svjetlosnih izvora ne može vidljivo interferirati, jer se ne može

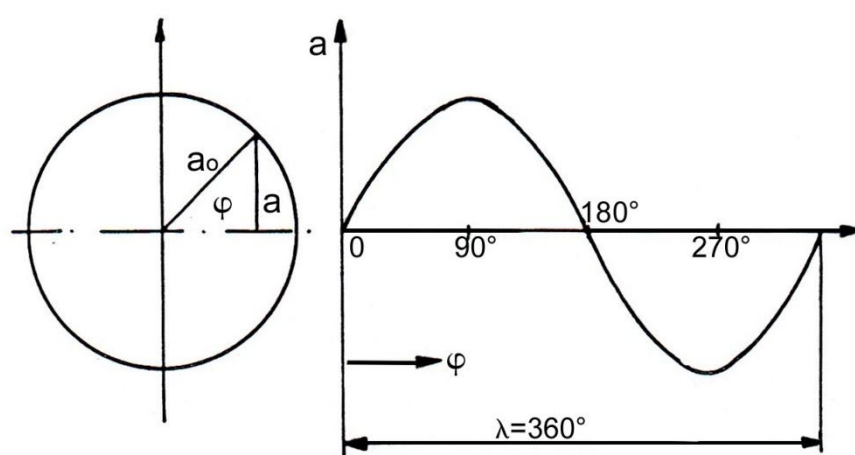
postići koherencija valova. U interferometrijskim uređajima primjenjuju se različiti sustavi–djelitelji svjetlosnih valova, koji valove iz istog izvora dovode do sastavljanja.

Interferirati mogu i ostali elektromagnetski valovi, no za precizno mjerenje dužina primjenjuju se samo elektromagnetski valovi optičkog spektra. Već sama činjenica da je mjerna jedinica u interferentnoj slici valna duljina primijenjenog zračenja upućuje na visoke točnosti optičke interferometrije uz valne duljine u vidljivom spektru 0,4 do 0,76 μm . Od različitih mogućnosti interferencija valova u mjernoj tehnici važni su slučajevi: a) interferencije dvaju valova iste frekvencije i iste amplitude i b) interferencije dvaju valova iste amplitude, ali različitih, a bliskih frekvencija. U svakom slučaju, amplitude valova moraju biti iste da bi postigli interferenciju.

3.1. Interferencija svjetlosti

Interferencija je tipična valna pojava pomoću koje se i prepoznala valna priroda elektromagnetskih valova posebno svjetlosti.

Kao takva, interferencija svjetlosti je međusobno djelovanje svjetlosnih tokova iz najmanje dva izvora koji uzrokuju pojačanje ili slabljenje intenziteta rezultantnog vala. Pri tome razlikujemo dvije važne veličine, amplitudu i fazu. Amplituda vala predstavlja maksimalni otklon od nultog položaja, dok se udaljenost između najbližih točaka koje imaju istu fazu titranja naziva valnom duljinom. Ona odgovara razlici faza od 360° i prikazana je na slici 4.



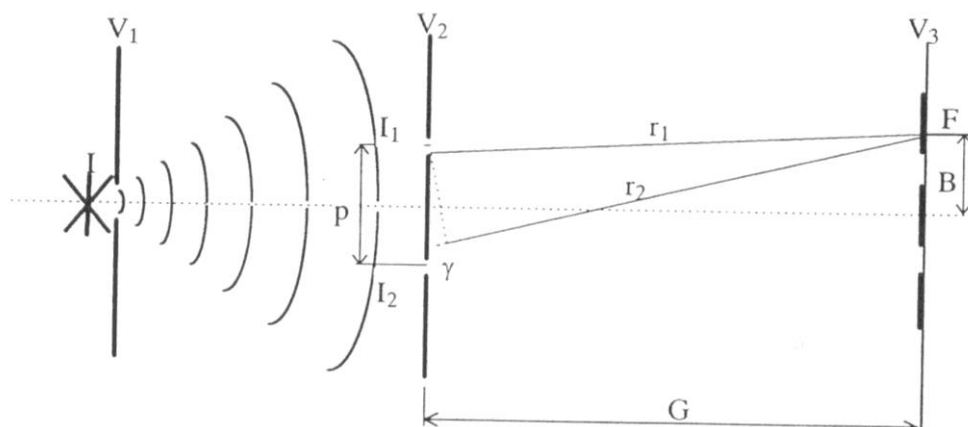
Slika 4. Sinusoidni val

Da bi se opazila pojava interferencije, oba svjetlosna vala trebaju biti koherentna, tj. moraju zadovoljavati sljedeće uvjete:

- svjetlosni valovi trebaju interferirati istovremeno u području promatranja,
- pomaci faza moraju biti stalni u dovoljno dugom vremenskom periodu,
- valne duljine moraju biti iste,
- valovi se moraju gibati u istoj ravnini,
- u slučaju razmaknutih svjetlosnih izvora, kut interferirajućih zraka mora biti malen.

3.2. Youngov pokus

Pokus Thomasa Younga (1773-1829), tzv. interferencija na dvije pukotine, prvi je put izveden 1801. god. i bio je jedan od prvih pokusa koji su potvrdili valnu prirodu svjetlosti. Young je pustio sunčevu svjetlost kroz malu pukotinu i zatim pomoću zastora V_2 s dvije bliske pukotine valnu frontu podijelio na dva dijela, tj. na dva koherentna vala. Na mjestima u prostoru gdje su se ta dva vala preklapala, Young je opazio maksimum i minimum svjetlosti (slika 5.).



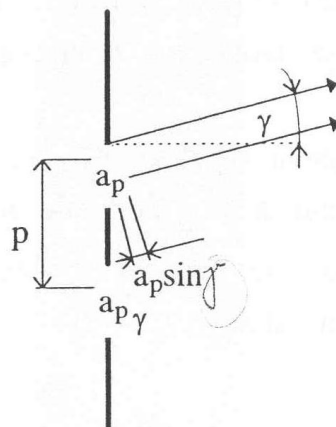
Slika 5. Youngove interferencije svjetlosti pomoću dvije pukotine.

I	- primarni izvor svjetlosti
I_1, I_2	- pukotine koje se ponašaju kao izvori dvaju koherentni elektromagnetskih valova
V_1, V_2, V_3	- zastori
G	- razmak između zastora V_2 i V_3
p	- razmak između sredina pukotina I_1 i I_2
r_1, r_2	- geometrijski put zraka 1 i 2
B	- razmak između dviju susjednih svijetlih (tamnih) pruga
γ	- kut između zrake i okomice na ravninu

Budući da pukotine nisu idealni točkasti izvori već imaju određenu širinu a_p , to valovi koji izlaze iz pojedine pukotine nisu u fazi. Razlika hoda između vala koji izlazi iz gornjeg ruba pukotine i onog iz donje dana je izrazom 3.1:

$$\frac{2\pi}{\lambda} = a_p \times \sin \gamma \quad (3.1)$$

gdje je γ kut između zrake i okomice na ravninu pukotine.



Slika 6. Uvjet koherencije

Ako se ne želi da širina pukotine utječe na interferencijsku sliku, mora biti ispunjen uvjet:

$$a_p \sin \gamma < \frac{\lambda}{2} \quad (3.2)$$

Uvjet koherencije vrijedi kada su svjetlosni valovi u zraku. Ako je izvor u sredstvu indeksa loma "n" uvjet glasi:

$$a_p \sin \gamma < \frac{\lambda_{sredstva}}{2} \quad (3.3)$$

gdje je $\lambda_{sredstva}$ valna duljina svjetlosti u sredstvu.

Pukotine se dakle ponašaju kao izvori dvaju koherentnih elektromagnetskih valova.

Intenzitet svjetlosti bit će maksimalan (konstruktivna interferencija) kada je razlika hoda Δr data izrazom:

$$\Delta r = a_p \times \sin \gamma = m\lambda \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (3.4)$$

Destruktivna interferencija nastaje na mjestu gdje je razlika hoda Δr :

$$\Delta r = a_p \times \sin \gamma = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (3.5)$$

Iz slike može se odrediti razmak B između dviju susjednih svjetlih (tamnih) pruga interferencije.

$$B = \frac{G\lambda}{p} \quad (3.6)$$

Pri proučavanju interferencije na dvije pukotine može se ustanoviti da razlika faza δ dvaju valova ovisi o njihovoj razlici hodova Δr . Pri tome su obje zrake putovale kroz zrak ($n=1$).

$$\delta = k_1 \times \Delta r = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r \quad (3.7)$$

Ako se pretpostavi da prvi val putuje sredstvom indeksa loma n_1 , a drugi sredstvom indeksa loma n_2 , valovi tada prevale različite optičke putove.

$$l_1 = n_1 r_1 \quad \text{ i } \quad l_2 = n_2 r_2 \quad (3.8)$$

Oba vala sastaju se i interferiraju u točki F. Optička razlika putova zrake 1 i zrake 2 biti će

$$\Delta r = n_2 r_2 - n_1 r_1, \quad (3.9)$$

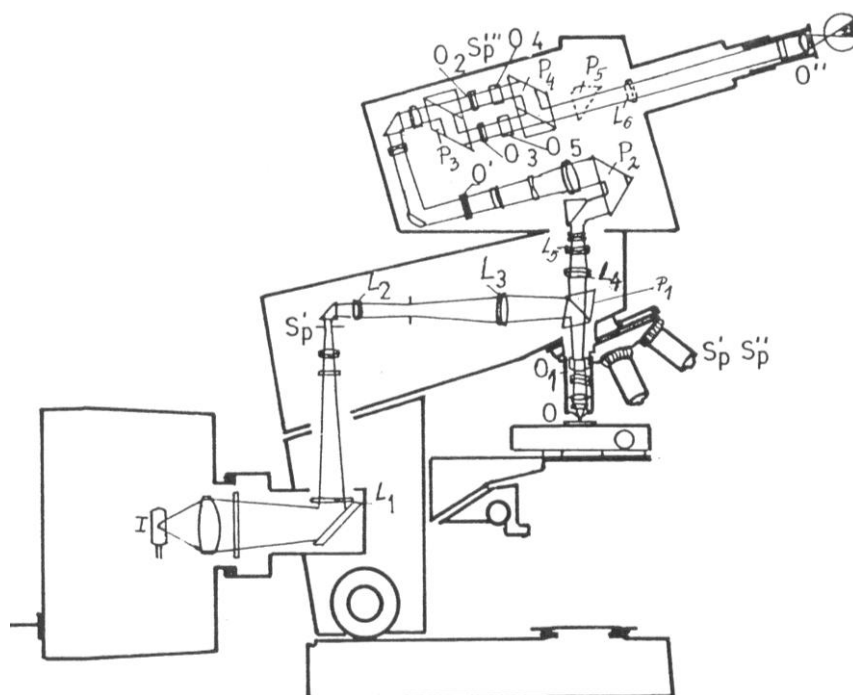
dok se razlika faze može prikazati izrazom 3.10:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l \quad (3.10)$$

Danas se za ostvarenje Youngove interferencije kao primarni izvor svjetlosti koristi laserski snop, npr. helij-neon lasera čije je zračenje dovoljno velike duljine koherentnosti da otpada zastor V_1 . Ispred primarnog izvora može se staviti interferencijski filter koji propušta relativno usko područje oko srednje valne duljine λ . Pukotine I_1 i I_2 osvijetle se neposrednim laserskim snopom. Tada je zamjetljivost pruga interferencije na zastoru V_3 vrlo velika. Pruge interferencije mogu se opaziti u čitavom području u kojem se snopovi svjetlosti izmiješaju i zovu se nelokalizirane pruge interferencije. U Youngovu uređaju dva se koherentna vala dobiju dijeljenjem valne fronte, tj. uzimanjem jednog dijela valne fronte za jedan val, a drugog dijela za drugi val.

4. Interferometrijski mikroskop Epival - Interphako

Navedeni je mikroskop prvenstveno namijenjen za interferencijska mjerenja dubina tehničkih površina kao i debljina tankih slojeva što je i primijenjeno u ovom slučaju kod mjerenja dubine brazde, njegove karakteristike omogućuju mu primjenu kao klasični mikroskop u druge mjerne svrhe (npr. mjerenje koraka i širine brazde, ispitivanje kvalitete tehničkih površina). Princip rada uređaja vidi se iz optičke sheme na slici 7. uz kratak opis radi kvalitetnijeg razumijevanja istog. [3]



Slika 7. Optička shema mikroskopa Epival – Interphako [3]

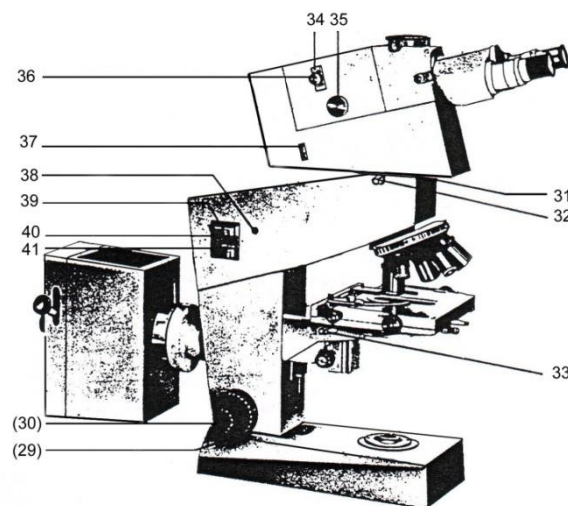
Izvorom svjetla (I) pomoću kolektora L_1 prosvjetljava se procjep S'_p . Važno je napomenuti da se umjesto procjeka može nalaziti rešetka ili prstenasti zaslon. Slika procjeka preslikava se pomoću leća L_2 i L_3 i diobene prizme P_1 u stražnju žarišnu ravninu objektiva O_1 . Objektiv preslikava sliku procjeka iz ravnine S'_p u beskonačnosti i nakon refleksije do objekta O opet se preslikava u svoju stražnju ravninu S''_p . Sistemom leća L_4 i L_5 slika procjeka S''_p preslikava se u ravninu S'''_p pomoću prizmi P_3 i P_4 sistema interferometra, okretnog optičkog klina O_2 ili prstenastog zaslona. Sliku objekta će objektiv i navedene grupe leća na kraju preslikati prema O i tada u ravninu okulara O'' .

Da bi se žarišna ravnina objektivu u svakom slučaju mogla preslikati u ravninu S''p, ugrađena je pomična prizma P2. Tanki stakleni klin O₄ djeluje kao fazni pomak, a ploče izjednačenja O₃ i O₅ služe za namještanje homogenog interferencijskog polja ili pruge u polju. Pri uključenju Bertrandove leće L₆ može se promatrati pupila, a pri uključivanju prizme P₅ svjetlost se skreće prema fotoaparatu. [4]

Prilikom zbrajanja promjena faznih duljina, na detektoru 1 dobije se ista promjena u fazi i tu nastaje svjetlo, dok na detektoru 2 imamo promjenu u fazi za pola valne duljine, te nastaje tama.

4.1. Epival - Interphako

Mjerenje dubine brazde d vršeno je interferencijskom metodom pomoću mikroskopa Epival - Interphako, proizvođača C. Zeiss Jena. [4]



Slika 8. Epival – Interphako [4]

4.2. Interferencijska metoda mjerenja dubine brazde d

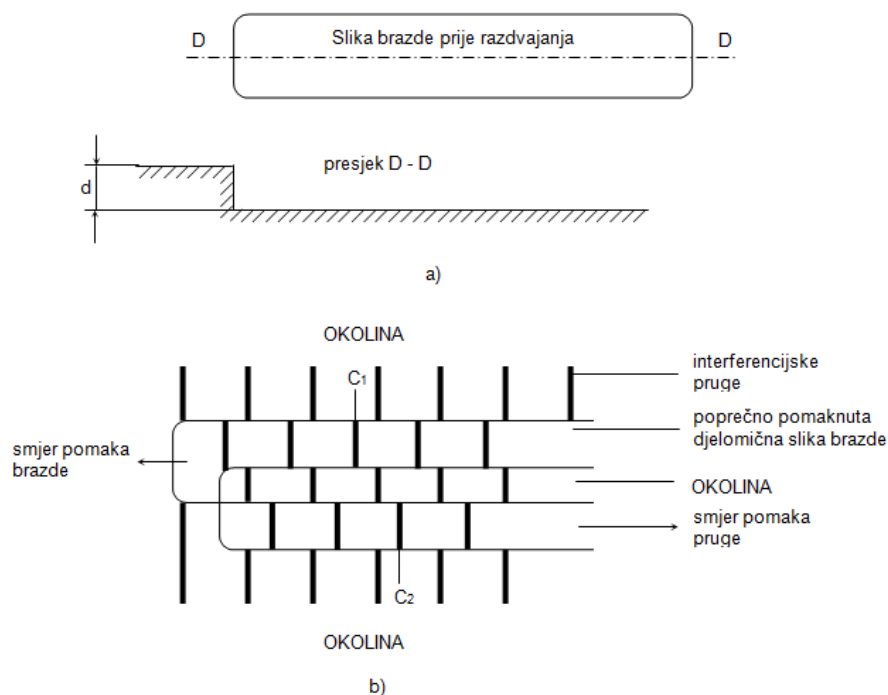
Ispunjenje prva dva uvjeta moguće je samo onda kada oba vala svjetlosti izlaze iz jedne te iste točke, tj. jednog izvora i kada su razlike hoda malene. Dakle, da bi se uopće dobila interferencija, mora se na neki način osigurati dva koherentna vala. To se postiže na više načina, a pri tome se koriste dvije metode.

1. Dva koherentna vala dobiju se dijeljenjem valne fronte tj. uzimanjem jednog dijela valne fronte za jedan val, a drugog dijela za drugi val. Na tom principu zasniva se Joungov pokus, Fresnelova biprizma, Fresnelova zrcala, Lloydova zrcala i dr.

2. Dva koherentna vala dobiju se djelomičnom refleksijom i djelomičnom transmisijom. Primjer je interferencija na tankom slojevima. Uređaji koji rade na tom principu su interferometri pomaka poznati kao Michelson, Mach-Zehnder, Jamin, Fabri Perot i dr. [4]

5. Shearing postupak

Kako je već prije objašnjeno, nastajanje interferencijskih pruga uvjetovano je međusobnim djelovanjem dvaju koherentnih snopova svjetlosti koji izlaze iz dviju bliskih slika I_1 i I_2 istog izvora svjetlosti i određenog razmaka. Kod Shearing postupka dva koherentna vala dobiju se dijeljenjem valne fronte tj. uzimanjem jednog dijela valne fronte za jedan val, a drugog dijela za drugi val. Razdvajanje svjetlosnog snopa slijedi tek nakon refleksije od objekta tj. u području stvaranja slike. Nakon toga se referentni val poprečno pomakne pomoću optičkog klina u područje stvaranja slike, koja u potpunosti sadrži strukturu objekta. Na taj način od objekta nastaje dvostruka slika. Primijenjen postupak poznat je pod nazivom Shearingov princip razdvajanja slike. Na slici 9. a) prikazana je brazda kako se vidi kroz okular prije razdvajanja slike, a na slici 9. b) dat je prikaz dvostruke poprečno pomaknute slike brazde nakon razdvajanja Shearing postupkom.



Slika 9. Prikaz dvostruko poprečno zamaknute slike brazde nakon razdvajanja Shearingovom metodom

Okolinu objekta u ovom slučaju čini gornja pozlaćena površina etalona na kojoj su vidljive pruge interferencije, a objekt čine djelomične slike pozlaćene brazde na kojima su pruge interferencije pomaknute u suprotnim smjeru na kojima su pruge baždarnog etalona na kojoj

surovima za jednake iznose s obzirom na interferencijske pruge u okolini i to ovisno o dubini brazde.

Razlika optičkih putova Δ , pomoću koje se može dobiti dubina brazde, može se tom metodom odrediti na dva načina:

- metodom s prugama
- metodom komparacije u homogenom polju

Po metodi s prugama razlika se optičkih putova može odrediti direktno na slici mjerenjem otklona pruge A na djelomičnoj slici objekta brazde i razmaka pruga B , te računanjem prema izrazu:

$$\Delta = \frac{A}{B} \cdot \lambda_s \quad (5.1)$$

λ_s – valna duljina korištene svjetlosti

Osim direktnog mjerenja u metodi s prugama, može se ono izvršiti i pomoću mjernog kompenzatora postavljanjem nitnog križa na odgovarajuće interferencijske pruge na objektu i okolini. Iz toga proizlazi razlika optičkih putova:

$$\Delta = (c_1 - c_2) \cdot Q \quad (5.2)$$

gdje su: Δ - razlika optičkih putova

c_1 i c_2 – očitavanja na skali mjernog kompenzatora

Q – faktor skale

Faktor skale Q određuje se pomicanjem nitnog križa između dviju pruga (ili više pruga) određene valne duljine u okolini objekta i očitavanjem razlike hoda mjernog kompenzatora:

$$Q = \frac{\lambda_s}{\text{očitana razlika hoda mjernog kompenzatora}} \quad (5.3)$$

Metoda komparacije u homogenom polju je pouzdanija, jer se mjeri dvostruka razlika hoda. Mjeri se tako da se jedna slika objekta postavi na određenu boju bijele svjetlosti ili najtamniju svjetlinu u monokromatskoj svjetlosti po cijeloj površini (pruge interferencije postavljene paralelno s ispitivanom površinom). Pomoću mjernog kompenzatora postavi se preko slike okoline druga slika objekta na istu boju bijele svjetlosti ili najtamniju svjetlinu u monokromatskoj svjetlosti.

U tom slučaju dvostruka razlika optičkih putova iznosi:

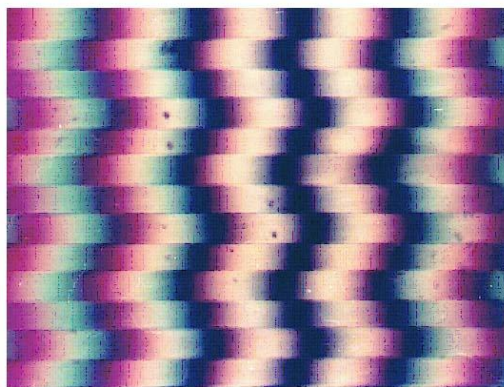
$$2\Delta = (c_1 - c_3) \cdot Q$$

(5.4)

c_1 i c_3 – očitavanja na skali mjernog kompenzatora

Pri radu objema metodama s monokromatskim izvorom svjetlosti mora se odrediti red interferencije ako nije sigurno poznato da mjerljiva razlika hoda nije manja od $\lambda s/2$.

U monokromatskoj svjetlosti to je moguće samo ako se mogu pratiti pruge s objekta na okolinu. Općenito red interferencije određuje se na osnovi interferencijskih boja s bijelom svjetlosti. Za to je najpouzdanija bezbojna interferencijska pruga nultog reda na koju se simetrično u suprotnim smjerovima priključuju interferencijske pruge raznih boja. Bezbojne pruge se markiraju na okolini i objektu i zbroji se koliko cijelih pruga ima između bezbojnih pruga. Njihov zbroj upravo odgovara redu interferencije. Primjer pruga interferencije prikazan je slikom 10.

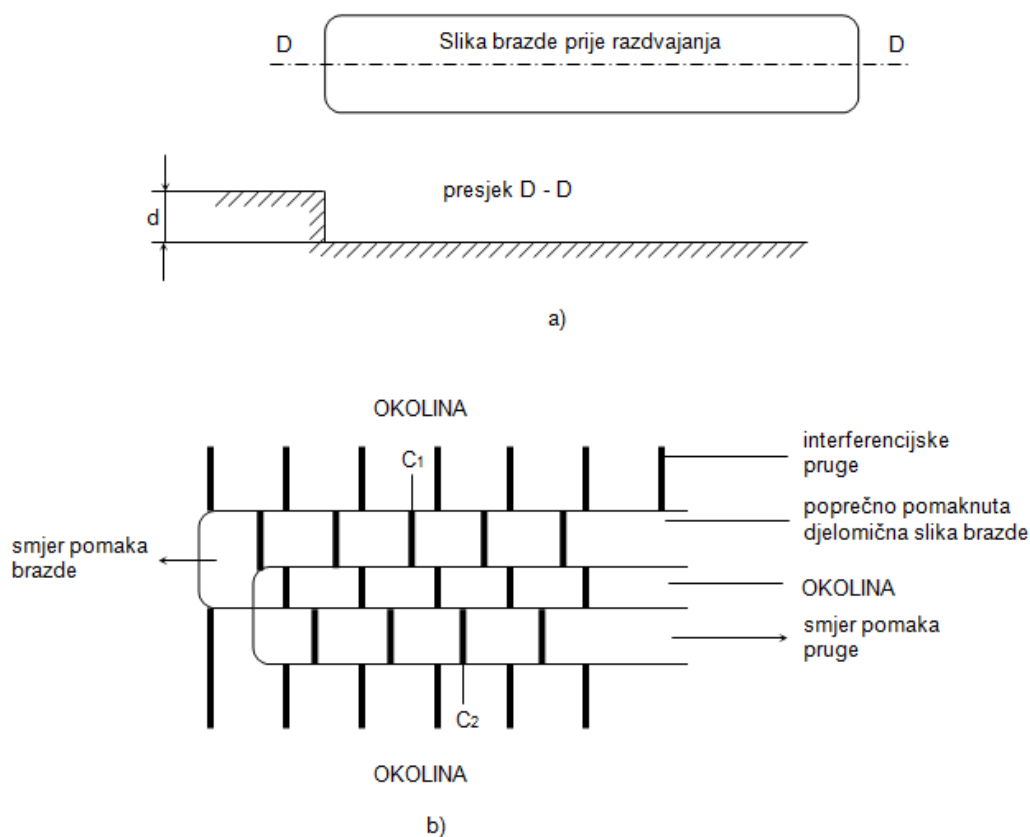


Slika 10. Pruge interferencije

6. MJERNA NESIGURNOST U POSTUPKU UMJERAVANJA DUBINE BRAZDE INTERFEROMETRIJSKOM METODOM

6.1. Modifikacija interferometrijskog mikroskopa Epival-Interphako

U cilju osiguravanja sljedivosti do definicije valnog metra i smanjenja mjernih nesigurnosti rezultata mjerenja dubine brazde d , u LFSB-u je provedena modifikacija interferencijskog mikroskopa *Epival-Interphako*. Na slici 11. a) prikazana je brazda kako se vidi kroz okular prije razdvajanja slike, a na slici 11. b) dan je prikaz dvostruke poprečno pomaknute slike brazde nakon razdvajanja Shearingovom metodom.

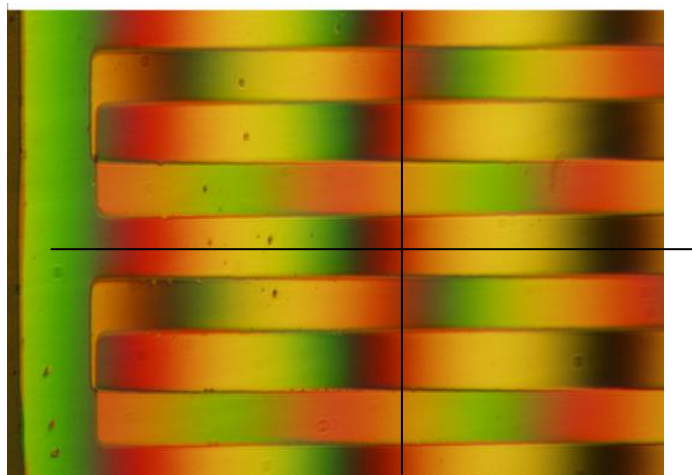


Slika 11. Prikaz dvostruko poprečno zamaknute slike brazde nakon razdvajanja Shearingovom metodom [2]

Okolinu objekta u ovom slučaju čini gornji dio površine referentnog etalona na kojem su vidljive pruge interferencije, a objekt čine djelomične slike brazde na kojima su pruge

interferencije pomaknute u suprotnim smjerovima za jednake iznose s obzirom na interferencijske pruge u okolini i to ovisno o dubini brazde.

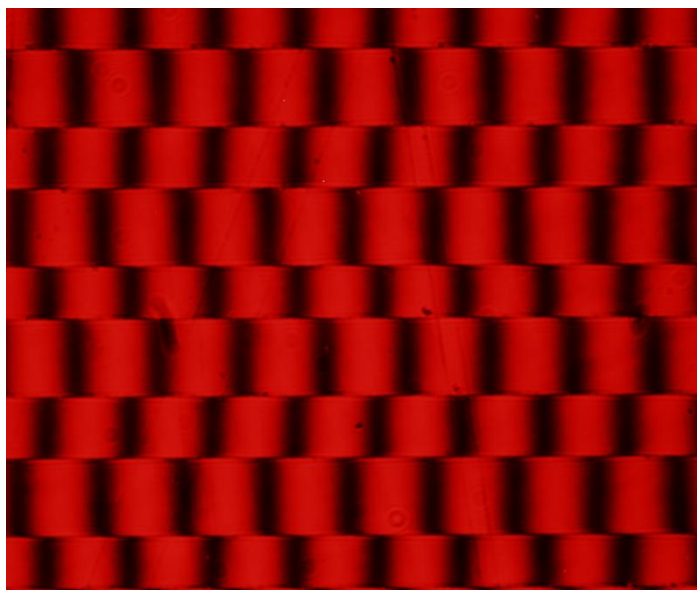
Originalno, izvor svjetlosti kod mikroskopa *Epival-interphako* je halogena lampa koja emitira svjetlo u cijelom vidljivom spektru. Razlika optičkih putova kod mikroskopa *Epival-Interphako* određuje se postavljanjem nitnog križa na odgovarajuće interferencijske pruge objekta, a očitavanja se vrše pomoću mjernog kompenzatora. Slika 12. prikaz je kako se interferogram vidi u okularu mjernog uređaja.



Slika 12. Interferogram snimljen na mikroskopu Epival-Interphako [2]

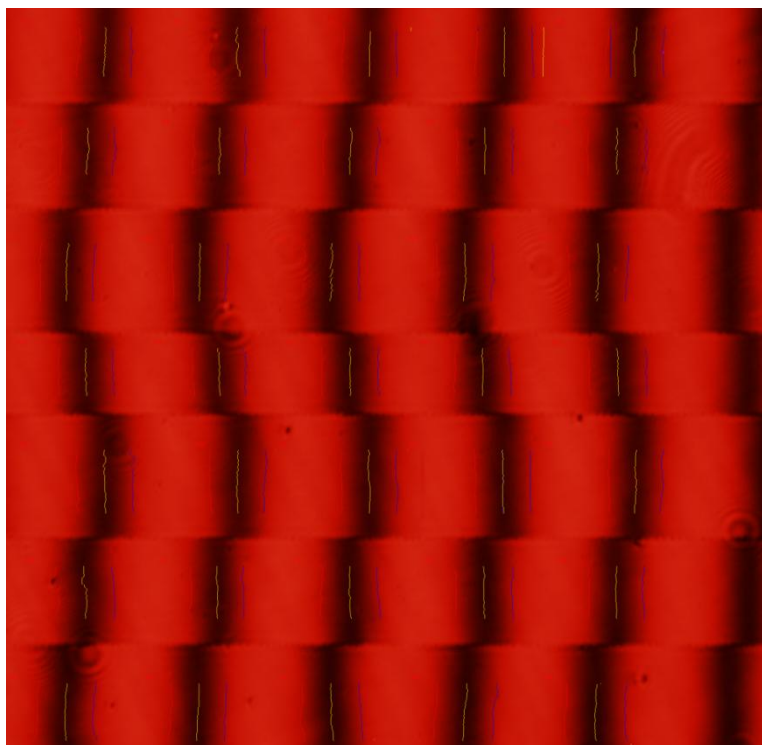
Kako se radi o prugama interferencije u spektru boja, otežano je pozicioniranje vertikalne linije nitnog križa na željenu bolju, što za posljedicu može imati veliko rasipanje rezultata mjerenja. Nadalje, tu je i problem nedovoljnog poznavanja vrijednosti valne duljine one boje na koju je okomita linija nitnog križa postavljena. Zbog utvrđenih razloga izvršena je modifikacija interferometrijskog mikroskopa. Modifikacija se sastojala od primjene CCD kamere *Olympus DP 70* s 12,5 megapiksela te zamjene originalnog izvora svjetlosti mikroskopa-halogene lampe s jedno stabiliziranim helij-neon laserom.

Na slici 13. prikazan je interferogram snimljen CCD kamerom, na modificiranom interferometrijskom mikroskopu *Epival-Interphako*.



Slika 13. Interferogram snimljen na modificiranom mikroskopu [2]

U LFSB-u je razvijen i softver za analizu interferograma. Program je napisan u *Visual Basicu*. Slika s kamere pretvara se u sliku sivih nijansi (engl. “*gray scale image*”). Potom koristeći x-y koordinate, oblikuje se pravokutnik oko jedne pruge interferencije. Unutar definiranog pravokutnika svi pikseli se konvertiraju u crno-bijelu kombinaciju koristeći unaprijed definirane *edge detectors*. Pozicija srednje linije pruge interferencije tada se određuje korištenjem matematičkih algoritama. Program potom automatski pronalazi pozicije srednjih linija ostalih pruga interferencije te računa vrijednosti aritmetičkih sredina i standardnih devijacija odnosa pruga koje su nužne za izračun vrijednosti dubine brazde. Na slici 14. prikazan je interferogram sa srednjim linijama određenim softverom.



Slika 14. Interferogram sa srednjim linijama ucrtanim softverom

Modifikacijom mikroskopa *Epival-Interphako* značajno je poboljšana točnost i preciznost mjernog uređaja. Naime, kako se radi o monokromatskom izvoru svjetlosti kod modificiranog mikroskopa, kao što je to laser, više nije upitna vrijednost valne duljine, a koja je nužna za izračun vrijednosti dubine brazde.

Nadalje, problem pozicioniranja srednjih linija na prugama interferencija uklonjen je s He-Ne laserom kao izvorom svjetlosti modificiranog mikroskopa i softverom razvijenim u LFSB-u.

6.2. Proračun mjerne nesigurnosti metodama GUM i MCS

Postupak proračunavanja mjerne nesigurnosti GUM metodom opće je prihvaćen i vrlo zastupljen na području mjeriteljstva. Osnovne značajke GUM metode mogu se navesti kako slijedi: [5]

- linearizacija matematičkog modela mjerene veličine $y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$
- ulazne veličine procjenjuju se iz pridruženih funkcija gustoće vjerojatnosti sljedećim parametrima: srednja vrijednosti x_i i standardno odstupanje $u(x_i)$
- primjena centralnog graničnog teorema
- izlazne veličine: $y = \dots$; $U = k \cdot u_c(y)$;

U određenim slučajevima, pri izračunu mjerne nesigurnosti, funkcijski odnosi su vrlo složeni ili nelinearni. Ulazne veličine o kojima ovisi izlazna veličina i same ovise o drugim veličinama što dovodi do složenog funkcijskog odnosa koji se ne može uvijek eksplicitno iskazati.

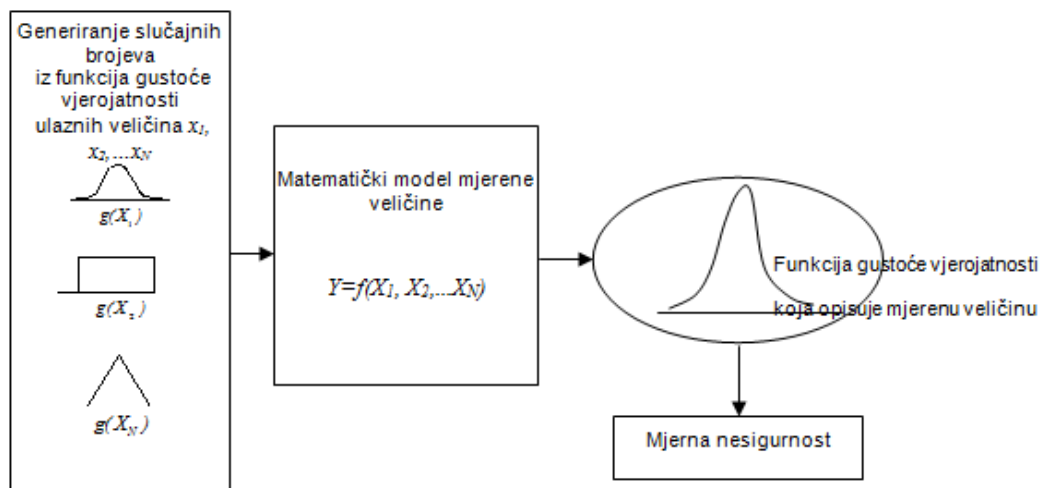
Također je važno reći da se proračun mjerne nesigurnosti GUM metodom temelji na centralnom graničnom teoremu čiji uvjeti u praksi ne moraju uvijek biti zadovoljeni. Izlazne veličine kod primjene GUM metode su najbolja procjena mjerene veličine y i proširena nesigurnost U uz faktor pokrivanja k i vjerojatnosti P . Pri tome se mogu javiti problemi pri određivanju faktora pokrivanja k koji se, uz primjenu centralnog graničnog teorema, direktno veže na normalnu razdiobu vjerojatnosti mjerene veličine.

Dok se proračun GUM metodom temelji na slaganju standardnih nesigurnosti uz stalna približenja normalnoj razdiobi, postupak proračuna MCS metodom temelji se na eksperimentalnoj funkciji gustoće vjerojatnosti dobivenoj slaganjem različitih funkcija gustoća vjerojatnosti ulaznih veličina. Monte Carlo simulacija je statistička simulacija povezana sa slučajnim događajima. Neki autori Monte Carlo simulacijama zovu bilo koju vrstu programa koji se koristi slučajnim brojevima. [2]

Osnovne značajke MCS metode mogu se navesti kako slijedi:

- ulazne veličine definirane su različitim funkcijama gustoće vjerojatnosti
- funkcije gustoće vjerojatnosti ulaznih veličina međusobno se kombiniraju i čine eksperimentalnu pdf mjerene (izlazne) veličine
- procjena izlazna veličina Y , te interval $(y_{(\frac{1-P}{2}) \cdot M}, y_{(\frac{1+P}{2}) \cdot M})$ za određenu vjerojatnost P procjenjuju se iz eksperimentalne pdf izlazne veličine

Ideja o primjeni Monte Carlo simulacije na mjerni sustav prikazana je slikom 15.



Slika 15. Monte Carlo simulacija mjernog sustava [2]

Iako su postupci procjene mjerne nesigurnosti (GUM metodom ili MCS metodom) primjenjivi u raznim mjernim uvjetima, za uspješnu primjenu njihovih pravila moraju biti uzeti u obzir specifični mjerni slučajevi. Specifičnosti postupka mjerenja i utjecajni faktori moraju biti dobro definirani prije određivanja nesigurnosti. Ključni faktori koji utječu u gotovo svakom postupku mjerenja su: etalon, predmet mjerenja, mjerni uređaj, mjeritelj i okolina u kojoj se provodi mjerenje..

6.3. Proračun mjerne nesigurnosti u postupku umjeravanja dubine brazde interferometrijskom metodom

U nastavku disertacije prikazan je proračun mjerne nesigurnosti u postupku umjeravanja dubine brazde d novih referentnih etalona apsolutnom metodom koristeći modificirani interferencijski mikroskop *Epival-Interphako*.

Proračun mjerne nesigurnost proveden je sukladno dokumentima ISO/IEC Guide 98-3:2008 i ISO/IEC Guide 98-3:2008/Suppl 1:2008. [2]

6.3.1. Matematički model

Matematički model mjerenja dan je izrazom:

$$d = (\kappa + F_r) \frac{\lambda}{2n} + \delta L_f + \delta L_\Omega + \delta L_s \quad (6.1)$$

gdje je:

d - dubina brazde

κ	- cijeli broj pruga interferencije
F_r	- pravi razlomak, tj. dio cijele pruge interferencije
λ	- valna duljina korištenog izvora svjetlosti
n	- indeks loma zraka
δL_f	- utjecaj geometrije brazde
δL_Ω	- utjecaj aperture
δL_s	- ponovljivost očitavanja

6.3.2. Nesigurnost mjerenja dubine brazde metodom pravih razlomaka u(df_{it})

Procjena dubine brazde računa se računalnim programom razvijenim u LFSB-u. Dubina brazde određena metodom pravih razlomaka d_{fit} može se prikazati prema izrazu:

$$d_{fit} = \frac{(\kappa + F_r) \cdot \lambda}{2 \cdot n} \quad (6.2)$$

Temeljem poznate nazivne dubine brazde d i poznate vrijednosti λ korištenog izvora svjetlosti određen je cijeli broj pruga κ , te slijedi $u(\kappa) = 0$. Utjecajne veličine u postupku mjerenja dubine etalona metodom pravih razlomaka su: pravi razlomak (dio pruge) korištenog izvora svjetlosti valne duljine λ u vakuumu i indeks loma zraka n_l s pripadajućim mjernim nesigurnostima $u(F_r)$, $u(\lambda)$, $u(n_l)$. Slijedi da se sastavljena varijanca može napisati prema izrazu (6.3) :

$$u_c^2(d_{fit}) = c_\kappa^2 \cdot u^2(\kappa) + c_{F_r}^2 \cdot u^2(F_r) + c_\lambda^2 \cdot u^2(\lambda) + c_n^2 \cdot u^2(n) \quad (6.3)$$

gdje je:

$$\begin{aligned} c_\kappa &= \frac{\partial d_{fit}}{\partial \kappa} = \frac{\lambda}{2 \cdot n} \\ c_{F_r} &= \frac{\partial d_{fit}}{\partial F_r} = \frac{\lambda}{2 \cdot n} \approx \frac{\lambda}{2} \\ c_\lambda &= \frac{\partial d_{fit}}{\partial \lambda} = \frac{\kappa + F_r}{2 \cdot n} = \frac{d}{\lambda} \\ c_n &= \frac{\partial d_{fit}}{\partial n} = -\frac{(\kappa + F_r) \lambda}{2 \cdot n^2} \approx -\frac{d}{n} = -d \end{aligned} \quad (6.4)$$

6.3.2.1. Standardna nesigurnost mjerenja pravih razlomaka $u(F_r)$

Pri mjerenju pravih razlomaka F_r standardna mjerna nesigurnost $u(F_r)$ određena je eksperimentalnim putem na temelju trideset ponovljenih mjerenja. Izračunata vrijednost standardne mjerne nesigurnosti valjana je za nazivne vrijednosti dubina brazdi 20 nm i 50 nm te iznosi:

$$u(F_r) = 0,001 \text{ pruge} \quad (6.5)$$

6.3.2.2. Standardna nesigurnost mjerenja valne duljine izvora svjetlosti $u_c(\lambda)$

Korišten je jedno stabiliziran He-Ne laser (proizvođača NPL). Navedeni referentni laser emitira 474 THz te je, primjenom tehnike zasićene apsorpcije u šupljini prijelaza, stabiliziran s frekvencijom prijelaza 11-5 R(127) molekule joda $^{127}\text{I}_2$. Prema Certifikatu br. LL0301/0901 standardna nesigurnost umjeravanja lasera iznosi:

$$u_c(\lambda) = 1,1 \cdot 10^{-11} \cdot \lambda \quad (6.6)$$

6.3.2.3. Standardna nesigurnost indeksa loma zraka $u(n)$

Indeks loma određen je mjerenjem parametara koji utječu na gustoću zraka te računanjem indeksa loma, koristeći izmijenjenu verziju Edlenove jednadžbe. Vrijednost standardne nesigurnosti indeksa loma zraka utvrđena je u iznosu od $12,9 \cdot 10^{-8}$ [35]. S obzirom na vrijednosti mjerenih dubina brazdi, pretpostavlja se da vrijednost standardne nesigurnosti indeksa loma ima zanemariv utjecaj te je stoga:

$$u_c(n) = 0 \quad (6.7)$$

6.3.2.4. Sastavljena standardna nesigurnost metode mjerenja pravih razlomaka $u_c(d_{fit})$

Sastavljena standardna nesigurnost metode mjerenja pravih razlomaka jednaka je pozitivnom drugom korijenu sastavljene varijance $u_c^2(d_{fit})$. Uvrštavanjem vrijednosti slijedi:

$$u_c^2(d_{fit}) = \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 \cdot (0,001 \text{ pruge})^2 + \left(\frac{d}{\lambda}\right)^2 \cdot u^2(\lambda) + (d)^2 \cdot u^2(n) \quad (6.8)$$

$$= (316,408)^2 \cdot (0,001)^2 + d^2 \cdot (1/\lambda)^2 \cdot (1,1 \cdot 10^{-11} \cdot \lambda)^2 + (-d)^2 \cdot (0)^2 = 0,0017 + 1,1 \cdot 10^{-22} \cdot d^2$$

za d u nm.

6.3.3. Nesigurnost uslijed utjecaja geometrije brazde $u(\delta L_f)$

Standardna mjerna nesigurnost utjecaja geometrije brazde $u(\delta L_f)$ određena je eksperimentalnim putem na temelju trideset ponovljenih mjerenja udaljenosti pruga interferencija. Izračunata vrijednost standardne mjerne nesigurnosti uslijed utjecaja geometrije brazde valjana je za nazivne vrijednosti dubina brazdi 20 nm i 50 nm te iznosi:

$$u(\delta L_f) = 0,294 \text{ nm} \quad (6.9)$$

6.3.4. Nesigurnost uslijed utjecaja aperture $u(\delta L_\Omega)$

U interferometrijskom mikroskopu *Epival-Interphako*, ulazna i izlazna apertura leže na optičkoj osi interferometra. Kao posljedica toga, svjetlost pada okomito na brazdu i njezinu okolinu te je iznos korekcije zbog utjecaja aperture jednaka 0.

Mjerna nesigurnost utjecaja aperture $u(\delta L_\Omega)$ ovisi o duljini fokusa leće kolimatora i dimenzijama aperture. Na temelju navoda iz literature [36] procjenjuje se da doprinos nesigurnosti iznosi:

$$u(\delta L_\Omega) = 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot d \quad , \quad (6.10)$$

d u nm.

6.3.5. Standardna nesigurnost ponovljivosti očitavanja korištenog softvera za analizu interferograma $u(\delta L_f)$

Utjecaj korištenog softvera za analizu interferograma određen je na temelju šezdeset ponovljenih mjerenja udaljenosti dviju pruga interferencija. Veličine stranica selektiranog pravokutnika oko prve pruge interferencije varirane su, kako bi se istražio utjecaj algoritma softvera na analizu pozicija srednjih linija pruga interferencija.

$$u(\delta L_s) = 0,027 \text{ nm} \quad (6.11)$$

6.3.6. Sastavljena standardna nesigurnost $uc(d)$

Komponente sastavljene standardne nesigurnosti prikazane su u tablici. Sastavljena standardna nesigurnost $uc(d)$ jednaka je drugom korijenu iz sume kvadrata navedenih utjecaja i iznosi:

$$u_c(d) = \sqrt{(0,43^2 + 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot d^2)} \text{ nm}, d \text{ u nm} \quad (6.12)$$

Tablica 1. Sastavnice standardne nesigurnosti u postupku umjeravanja dubine brazde interferencijskom metodom [2]

Sastavnica standardne mjerne nesigurnosti	Izvor nesigurnosti	Iznos standardne nesigurnosti $u(x_i)$ d u nm	Razdioba	Koeficijent osjetljivosti $c_i = \partial d / \partial x_i$	Doprinos mjernoj nesigurnosti $u_i(d)$, nm d u nm
κ	Cijeli broj pruga interferencije	0	-	$\frac{\lambda}{2}$	0
F_r	Dio cijele pruge interferencije	0,001 pruge	Normalna	$\frac{\lambda}{2}$	0,316
λ	Valna duljina izvora svjetlosti	$1,1 \cdot 10^{-11} \cdot \lambda$	Normalna	$\frac{d}{\lambda}$	$1,1 \cdot 10^{-11} \cdot d$
n	Indeks loma zraka	0	Normalna	$-d$	0
δL_f	Utjecaj geometrije brazde	0,294 nm	Normalna	1	0,294
δL_Ω	Utjecaj aperture	$0,5 \cdot 10^{-4} \cdot d$	Pravokutna	1	$0,5 \cdot 10^{-4} \cdot d$
δL_s	Utjecaj ponovljivosti očitavanja	0,027 nm	Normalna	1	0,027
Sastavljena standardna nesigurnost $u_c(d)$				$u_c^2(d) = (0,43^2 + 0,5 \cdot 10^{-4} d^2) \text{ nm}^2, d \text{ u nm}$	
Proširena mjerna nesigurnost U za $k = 2$; $P = 95\%$				$U = 0,9 \text{ nm}$	

Kako je iznos drugog člana binoma zanemariv u odnosu na prvi član, linearizacija sastavljene standardne nesigurnosti $u_c(d)$ nema opravdanja. Stoga sastavljena standardna nesigurnost $u_c(d)$ u postupku mjerenja dubine brazde novih etalona interferencijski iznosi:

$$u_c(d) = 0,43 \text{ nm} \quad (6.13)$$

Uz pretpostavku normalne razdiobe, uz faktor pokrivanja $k = 2$ i vjerojatnost $P = 95 \%$ proširena mjerna nesigurnost iznosi:

$$U = 0,9 \text{ nm} \quad (6.14)$$

6.3.7. Proračun mjerne nesigurnosti primjenom MCS

Proračun mjerne nesigurnosti pri umjeravanju dubine brazdi interferometrijskom metodom također je proveden i primjenom Monte Carlo simulacija. MCS metoda je primijenjena, osim za izračun mjerne nesigurnosti, i u svrhu vrednovanja rezultata dobivenih primjenom GUM postupka. U radu je proračun mjerne nesigurnosti MCS metodom izvršen koristeći MathCad

program. Funkcije gustoće vjerojatnosti izlazne veličine d simulirane su MSC metodom na osnovu izraza:

$$d = (\kappa + F_r) \frac{\lambda}{2n} + \delta L_f + \delta L_\Omega + \delta L_s \quad (6.15)$$

Ulazne veličine X_i za etalone nazivnih dubina brazdi 20 nm i 50 nm definirane su funkcijama gustoća vjerojatnosti $g(x_i)$ kako je prikazano u tablici.

Tablica 2. Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine d za etalon nazivne dubine brazde $d = 20$ nm [2]

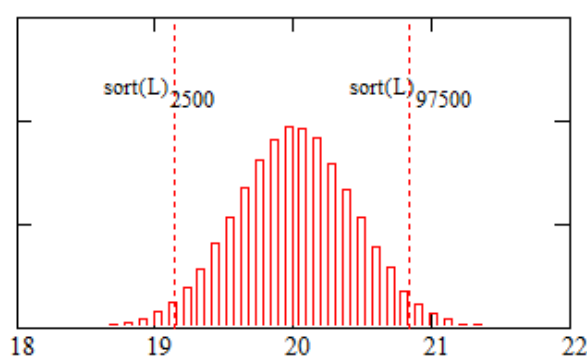
Ulazna veličina x_i		Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$
Cijeli broj pruga interferencije	κ	-
Dio cijele pruge interferencije	F_r	Normalna razdioba (M; 0 nm; 0,316 nm)
Valna duljina izvora svjetlosti	λ	Normalna razdioba (M; 0 nm; $2,2 \cdot 10^{-10}$ nm)
Indeks loma zraka	n	-
Utjecaj geometrije brazde	δL_f	Normalna razdioba (M; 0 nm; 0,294 nm)
Utjecaj aperture	δL_Ω	Pravokutna razdioba (M; 0 nm; 10^{-3} nm)
Utjecaj ponovljivosti očitavanja	δL_s	Normalna razdioba (M; 0 nm; 0,027 nm)

Tablica 3. Ulazne veličine i funkcije gustoće vjerojatnosti u postupku simulacije veličine d za etalon nazivne dubine brazde $d = 50$ nm [2]

Ulazna veličina x_i		Funkcija gustoće vjerojatnosti $g(x_i)$
Cijeli broj pruga interferencije	κ	-
Dio cijele pruge interferencije	F_r	Normalna razdioba (M; 0 nm; 0,316 nm)
Valna duljina izvora svjetlosti	λ	Normalna razdioba (M; 0 nm; $5,5 \cdot 10^{-10}$ nm)
Indeks loma zraka	n	-
Utjecaj geometrije brazde	δL_f	Normalna razdioba (M; 0 nm; 0,294 nm)

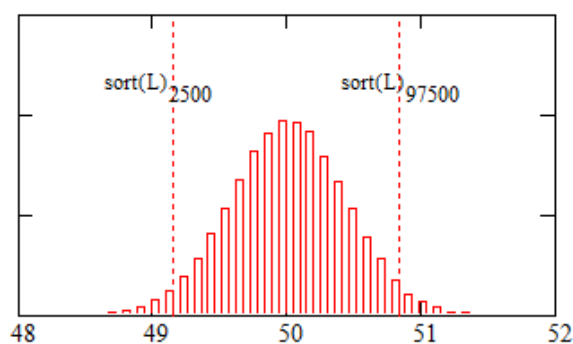
Utjecaj aperture	δL_{Ω}	Pravokutna razdioba (M; 0 nm; $2,5 \cdot 10^{-3}$ nm)
Utjecaj ponovljivosti očitavanja	δL_s	Normalna razdioba (M; 0 nm; 0,027 nm)

Funkcije gustoće vjerojatnosti $g(d)$ izlazne veličine d dobivene su uz $M = 100000$ simulacija. Funkcije gustoće vjerojatnosti izlazne veličine d za nazivne dubine brazdi 20 nm i 50 nm prikazane su na slikama 16. i 17.



Slika 16. Funkcije gustoće vjerojatnosti $g(d)$ za etalon nazivne dubine brazde 20 nm [2]

Procijenjeno standardno odstupanje izlazne veličine d za etalon nazivne dubine brazde 20 nm iznosi 0,43 nm. Ista vrijednost procijenjenog standardnog odstupanja izlazne veličine d utvrđena je kod etalona nazivne dubine brazde 50 nm, čime su potvrđene mjerne nesigurnosti dobivene GUM metodom. Također funkcije gustoće vjerojatnosti $g(d)$ izlazne veličine d , a koje su prikazane na slici 17., potvrđuju normalne razdiobe izlaznih veličina.



Slika 17. Funkcije gustoće vjerojatnosti $g(d)$ za etalon nazivne dubine brazde 50 nm [2]

Izlazna veličina d za etalon nazivne dubine brazde 20 nm nalazi se unutar intervala:

$$(Y_{0,025} = 19,15 \text{ nm}; Y_{0,975} = 20,84 \text{ nm}) \text{ uz } P = 95 \%. \quad (6.16)$$

Izlazna veličina d za etalon nazivne dubine brazde 50 nm nalazi se unutar intervala:

$$(Y_{0,025} = 49,151 \text{ nm}; Y_{0,975} = 50,84 \text{ nm}) \text{ uz } P = 95 \%. \quad (6.17)$$

Proširena mjerna nesigurnost procijenjena MCS metodom iznosi:

$$U = 0,9 \text{ nm uz } P = 95 \% \quad (6.18)$$

7. Analiza korekcije rezultata mjerenja dubine brazde na interferometrijskom mikroskopu Epival-Interphako

U okviru rada provedeno je mjerenje 8 etalona koristeći 5 različitih izvora svjetla. U tablici 4. prikazani su etaloni na kojima se vršilo ispitivanje te njihove referentne dubine. U tablici 5. prikazani su različiti izvori svjetlosti.

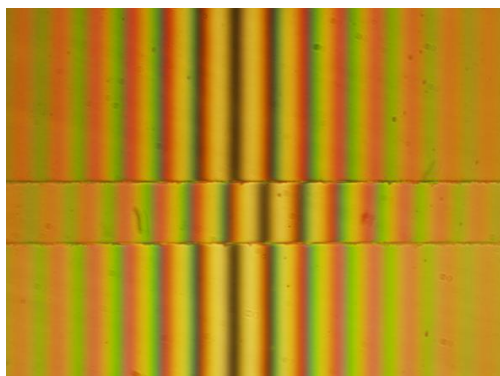
Tablica 4. Zadani etaloni [1]

Etalon	d_{ref} , nm
0-17	60
0-19	240
0-21	961
0-6	1651
0-8	3895
0-24	3883
G1	931
G2	956

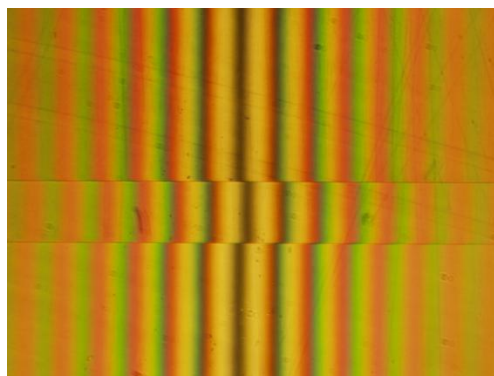
Tablica 5. Različiti izvori svjetlosti

λ , nm				
		Edmund Optics, 5-Color Tunable Helium-Neon Laser		
Halogena lampa	Renishaw laser - crvena boja	Crvena boja	Žuta boja	Zelena boja
550	632,8	632,8	594	543

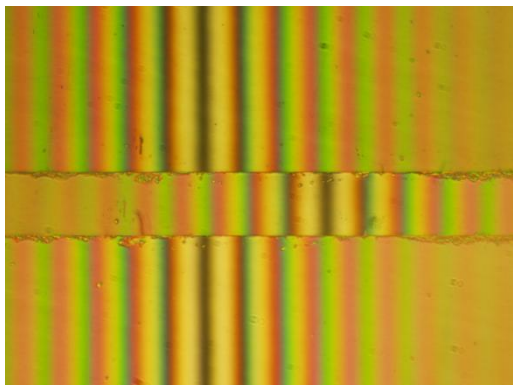
Izvor svjetlosti: halogena lampa



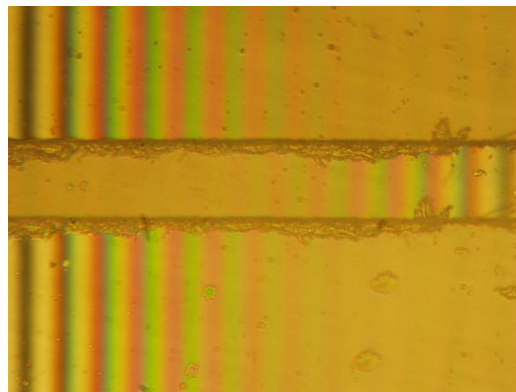
Slika 18. 0-17 halogena lampa



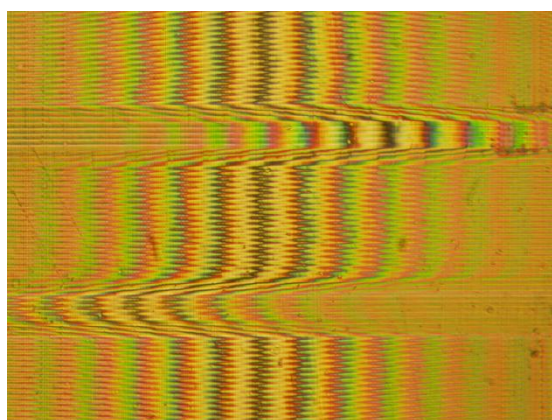
Slika 19. 0-19 halogena lampa



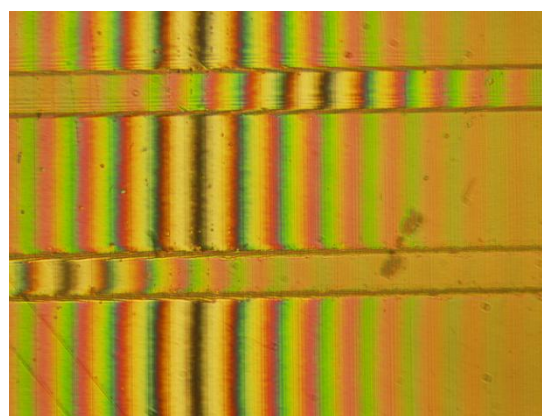
Slika 20. 0-21 halogena lampa



Slika 21. 0-24 halogena lampa

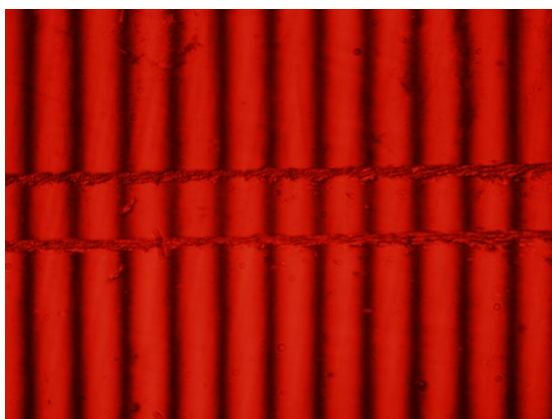


Slika 22. G1 halogena lampa

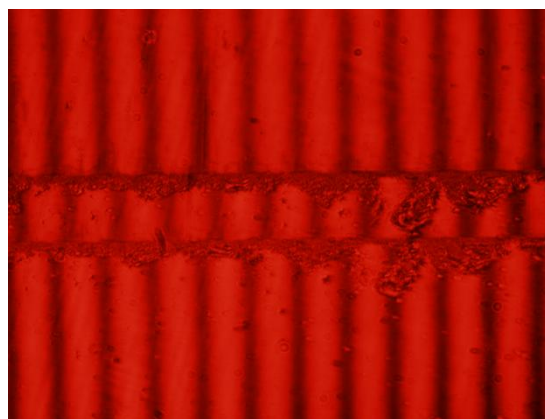


Slika 23. G2 halogena lampa

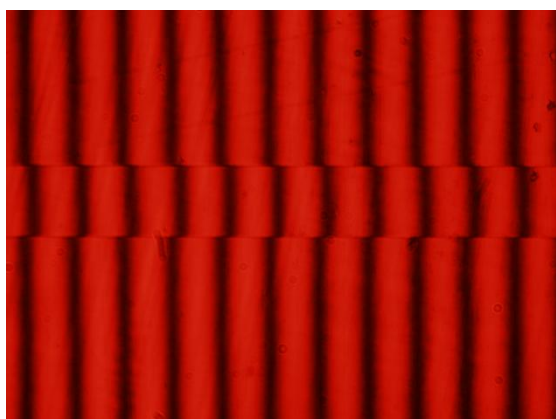
Izvor svjetlosti: Edmund Optics, 5-Color Tunable Helium-Neon Laser - crvena boja



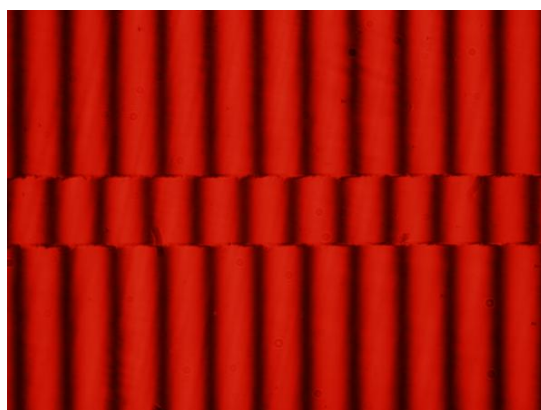
Slika 24. Crvena boja 0-6



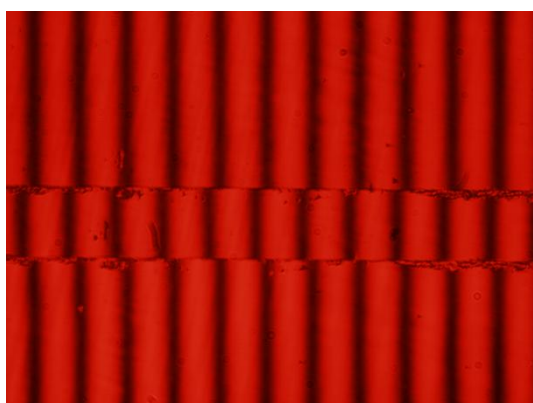
Slika 25. Crvena boja 0-8



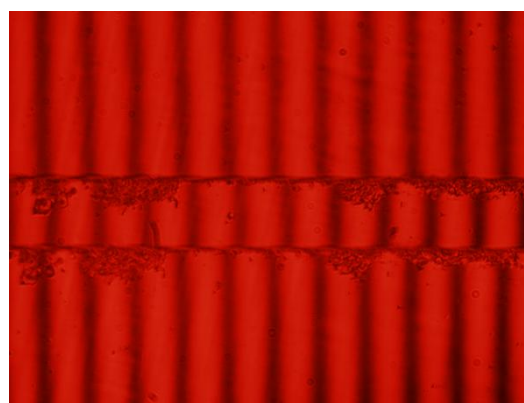
Slika 26. Crvena boja 0-17



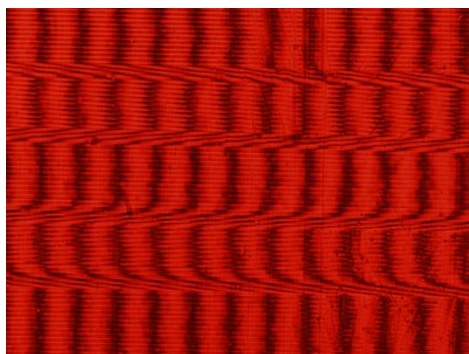
Slika 27. Crvena boja 0-19



Slika 28. Crvena boja 0-21



Slika 29. Crvena boja 0-24

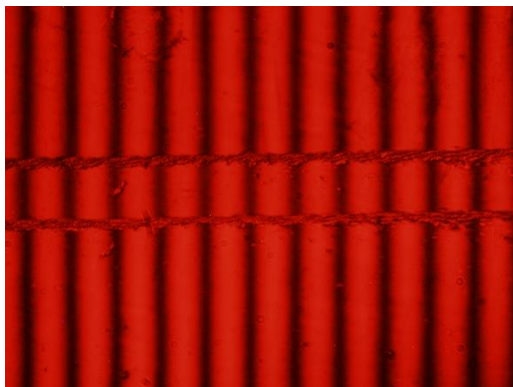


Slika 30. Crvena boja G1

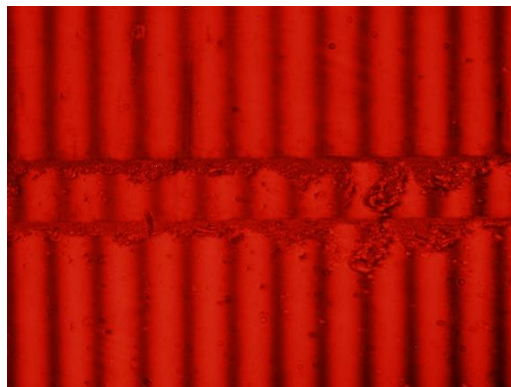


Slika 31. Crvena boja G2

Izvor svjetlosti: Renishaw laser - crvena boja



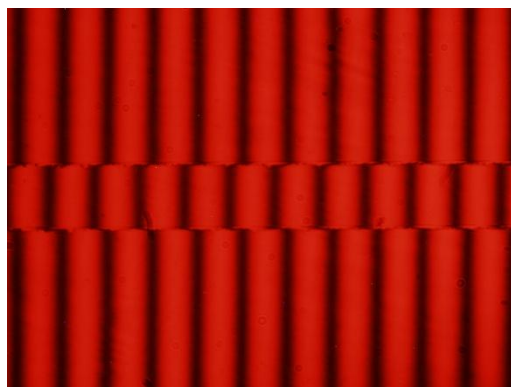
Slika 32. 0-6 Renishaw laser



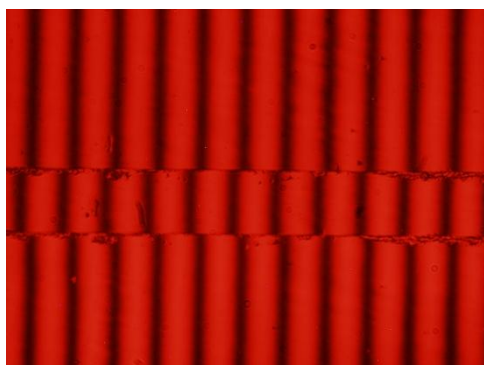
Slika 33. 0-8 Renishaw laser



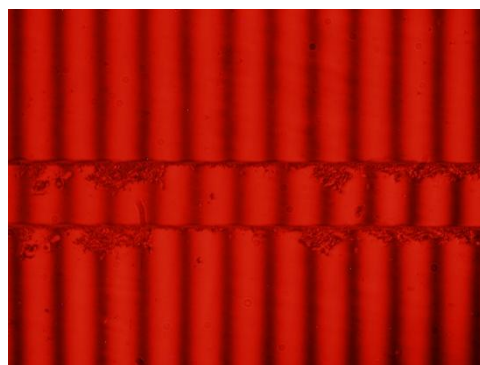
Slika 34. 0-17 Renishaw laser



Slika 35. 0-19 Renishaw laser

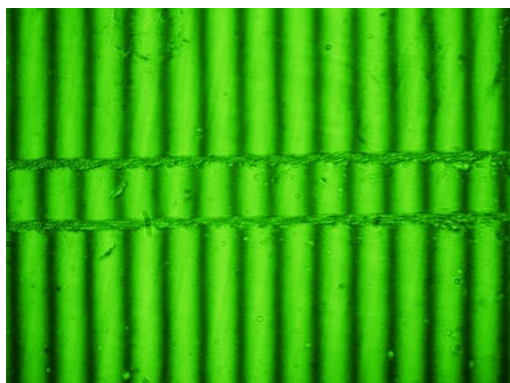


Slika 36. 0-21 Renishaw laser

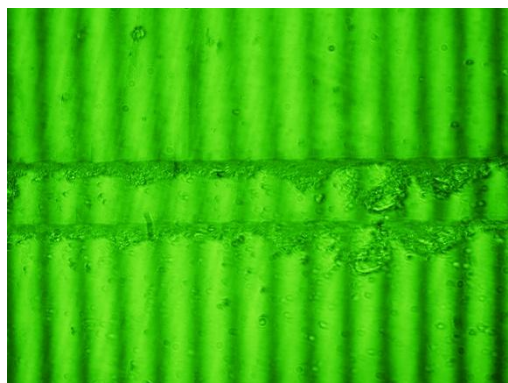


Slika 37. 0-24 Renishaw laser

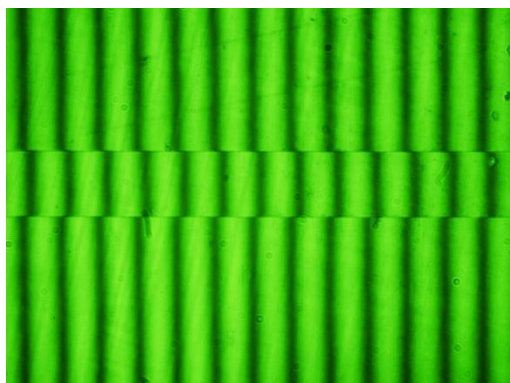
Izvor svjetlosti: Edmund Optics, 5-Color Tunable Helium-Neon Laser - zelena boja



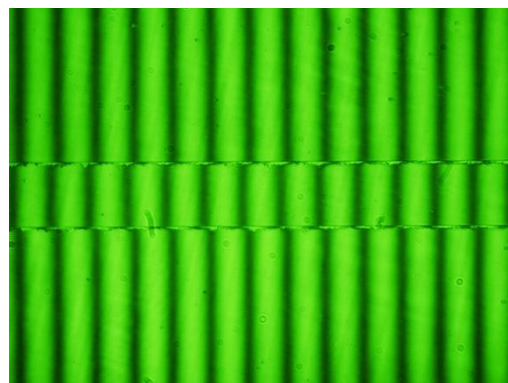
Slika 38. 0-6 Zelena boja



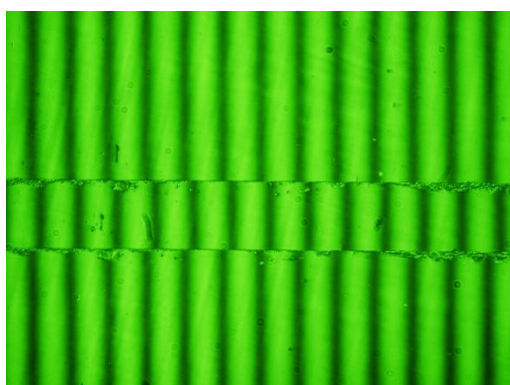
Slika 39. 0-8 Zelena boja



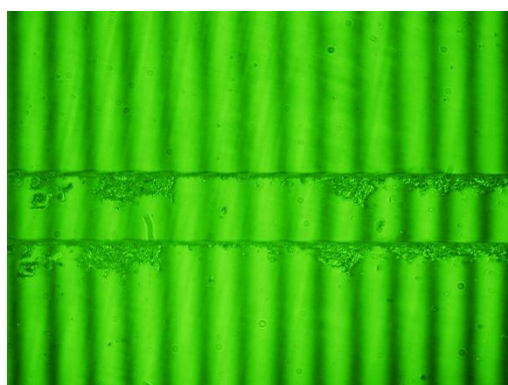
Slika 40. 0-17 Zelena boja



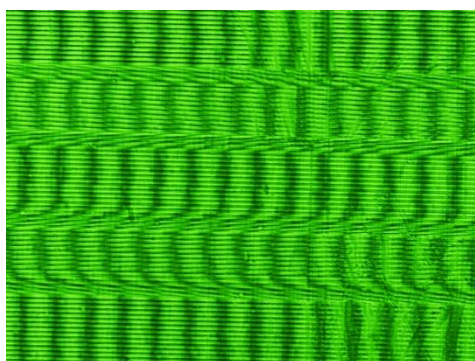
Slika 41. 0-19 Zelena boja



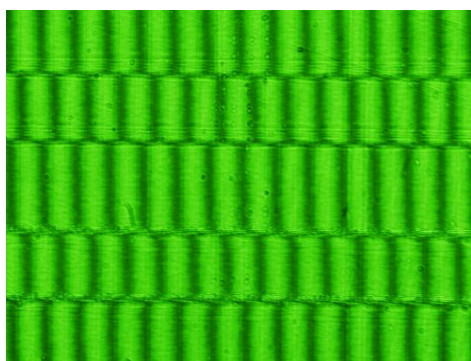
Slika 42. 0-21 Zelena boja



Slika 43. 0-24 Zelena boja

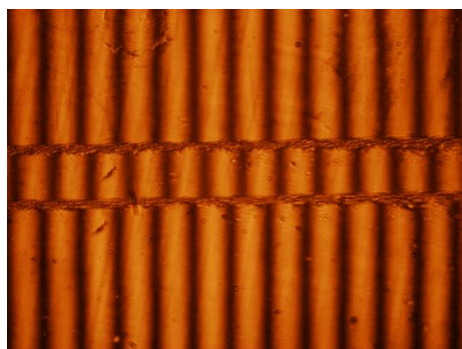


Slika 44. G1 Zelena boja

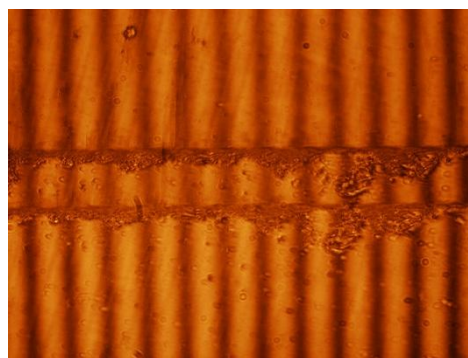


Slika 45. G2 Zelena boja

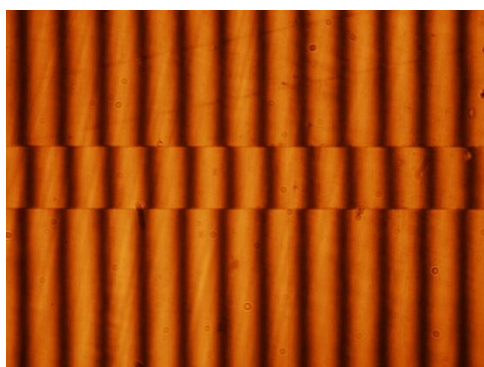
Izvor svjetlosti: Edmund Optics, 5-Color Tunable Helium-Neon Laser - žuta boja



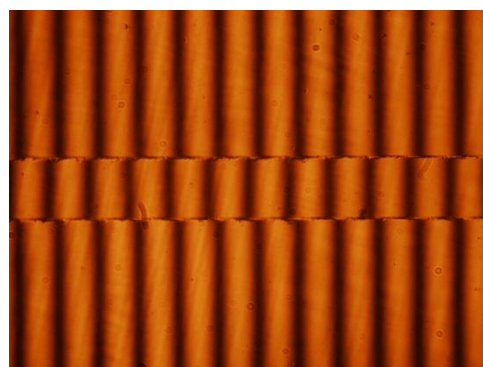
Slika 46. 0-6 Žuta boja



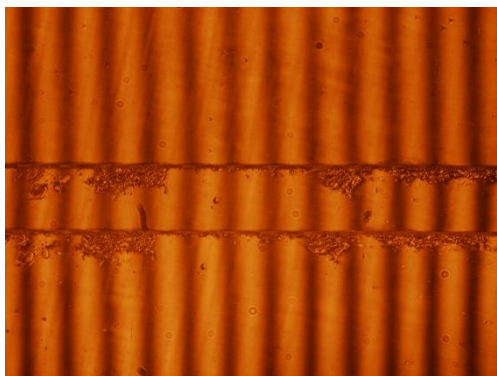
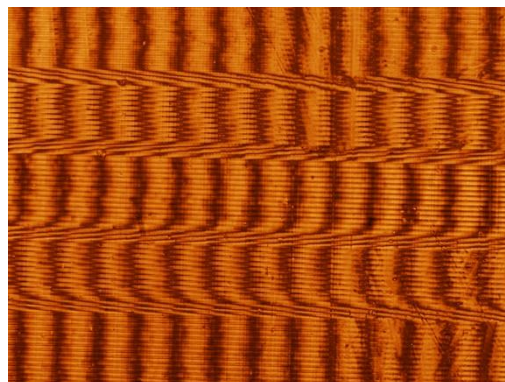
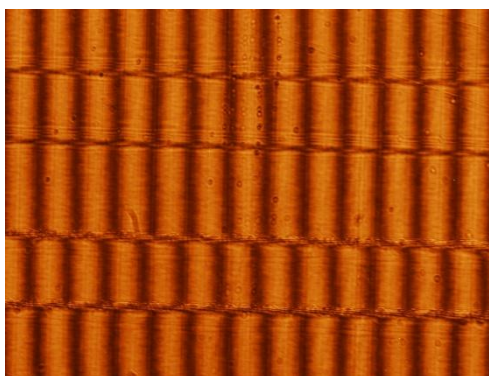
Slika 47. 0-8 Žuta boja



Slika 48. 0-17 Žuta boja

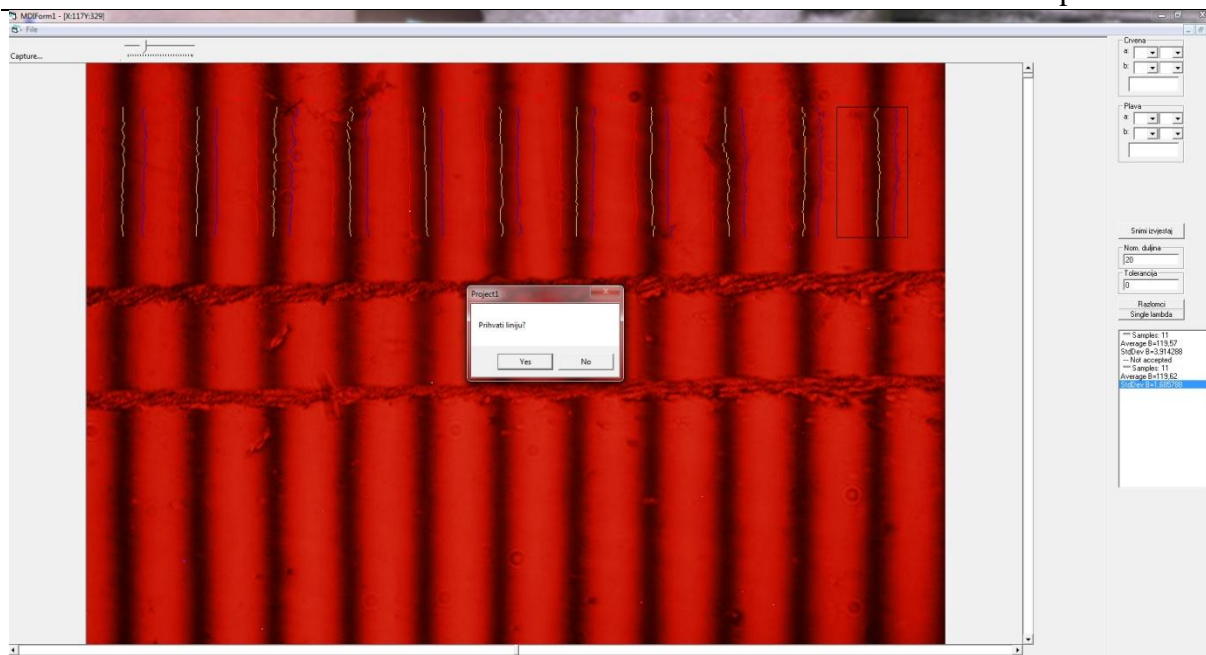


Slika 49. 0-19 Žuta boja

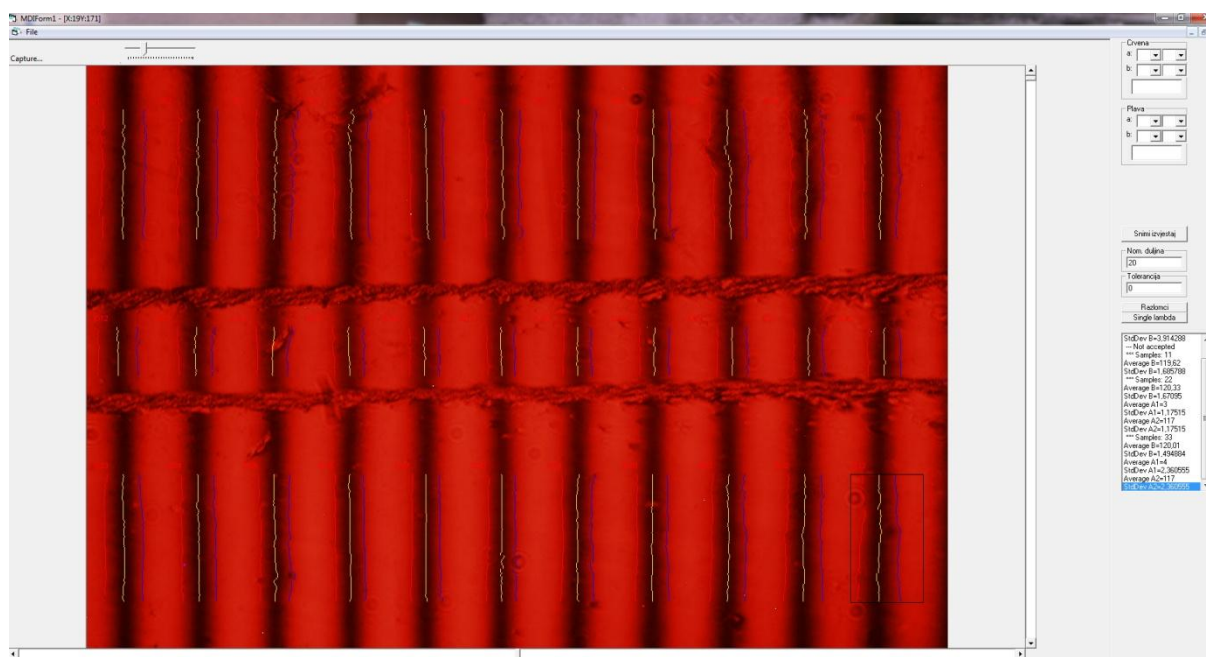
**Slika 50. 0-24 Žuta boja****Slika 51. G1 Žuta boja****Slika 52. G2 Žuta boja**

Softver za analizu interferograma

U LFSB-u je razvijen softver za analizu interferograma. Program je napisan u *Visual Basicu*. Slika s kamere pretvara se u sliku sivih nijansi (engl. “*gray scale image*”). Potom koristeći x-y koordinate, oblikuje se pravokutnik oko jedne pruge interferencije. Unutar definiranog pravokutnika svi pikseli se konvertiraju u crnobijelu kombinaciju koristeći unaprijed definirane *edge detectors*. Pozicija srednje linije pruge interferencije tada se određuje korištenjem matematičkih algoritama. Program potom automatski pronalazi pozicije srednjih linija ostalih pruga interferencije te računa vrijednosti aritmetičkih sredina i standardnih devijacija odnosa pruga koje su nužne za izračun vrijednosti dubine brazde. Na slikama 53. i 54. prikazana su sučelja programa te podaci koji su se očitavali za analizu slike.



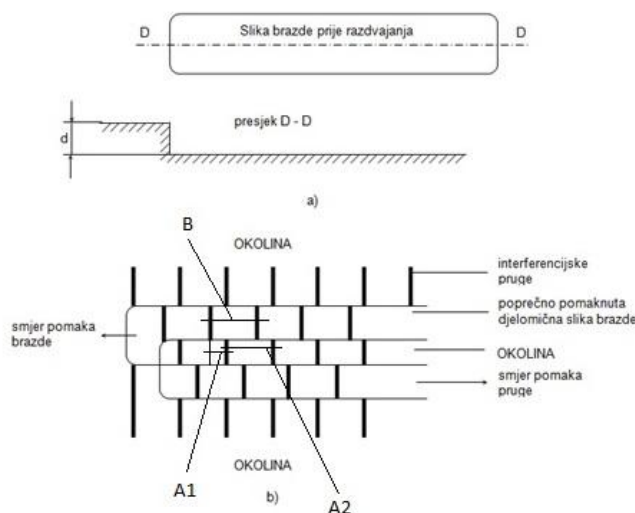
Slika 53. Program za analizu slike - početna



Slika 54. Program za analizu slike

7.1. Ostvareni rezultati mjerenja dubine brazde d

Na tablicama od 6. - 32. prikazani su rezultati mjerenja veličina B , A_1 i A_2 ostvareni na interferogramima iz poglavlja 6.



Slika 55. Prikaz brazde i okoline

Sljedeće tablice sastoje se od 3 segmenta. U prvom segmentu prikazane su rezultati mjerenja B u okolini. U drugom segmentu prikazani su rezultati mjerenja B , A_1 i A_2 u okolina + brazda. U trećem segmentu tablice prikazani su rezultati mjerenja B , A_1 i A_2 u okolina + brazda + okolina.

Analiza se vršila na sljedeći način. za svaki etalon odabrano se područje koje se oblikuje kao pravokutnik oko jedne pruge interferencije. Postupak se ponavljao na svakom etalonu za okolinu, brazdu + okolinu te okolinu + brazdu + okolinu. Na slici 55. se vidi prikaz brazde i okoline.

Edmund Optics, 5-Color Tunable Helium-Neon Laser - Crvena boja**Tablica 6. Crvena boja 0-6 rezultati**

okolina	Etalon 0-6	Crvena boja
	<i>B</i>	119,77
	Broj uzoraka <i>n</i>	11
	StdDev <i>B</i>	5,081693
okolina + brazda	Etalon 0-6	Crvena boja
	Novi <i>B</i>	119,88
	Broj uzoraka <i>n</i>	22
	StdDev <i>B</i>	3,685495
	<i>A1</i>	6
	<i>A2</i>	116
	StdDev <i>A1</i>	2,242456
	StdDev <i>A2</i>	2,242456
okolina + brazda + okolina	Etalon 0-6	Crvena boja
	Novi <i>B</i>	119,9
	Broj uzoraka <i>n</i>	33
	StdDev <i>B</i>	3,0652
	<i>A1</i>	5
	<i>A2</i>	116
	StdDev <i>A1</i>	2,20288
	StdDev <i>A2</i>	2,20288

Tablica 7. Crvena boja 0-8 rezultati

okolina	Etalon 0-8	Crvena boja
	<i>B</i>	122,47
	Broj uzoraka <i>n</i>	10
	StdDev <i>B</i>	8,158748
okolina + brazda	Etalon 0-8	Crvena boja
	Novi <i>B</i>	122,78
	Broj uzoraka <i>n</i>	20
	StdDev <i>B</i>	5,968919
	<i>A1</i>	49
	<i>A2</i>	73
	StdDev <i>A1</i>	9,152263
	StdDev <i>A2</i>	9,152263
okolina + brazda + okolina	Etalon 0-8	Crvena boja
	Novi <i>B</i>	121,55
	Broj uzoraka <i>n</i>	30
	StdDev <i>B</i>	5,206666
	<i>A1</i>	45
	<i>A2</i>	77
	StdDev <i>A1</i>	13,72097
	StdDev <i>A2</i>	13,72097

Tablica 8. Crvena boja 0-17 rezultati

okolina	Etalon 0-17	Crvena boja
	<i>B</i>	120,72
	Broj uzoraka <i>n</i>	10
	StdDev <i>B</i>	8,970811
okolina + brazda	Etalon 0-17	Crvena boja
	Novi <i>B</i>	120,9
	Broj uzoraka <i>n</i>	20
	StdDev <i>B</i>	6,311307
	<i>A1</i>	20
	<i>A2</i>	100
	StdDev <i>A1</i>	6,550282
	StdDev <i>A2</i>	6,550282
okolina + brazda + okolina	Etalon 0-17	Crvena boja
	Novi <i>B</i>	120,83
	Broj uzoraka <i>n</i>	30
	StdDev <i>B</i>	5,145856
	<i>A1</i>	19
	<i>A2</i>	101
	StdDev <i>A1</i>	6,152354
	StdDev <i>A2</i>	6,152354

Tablica 9. Crvena boja 0-19 rezultati

okolina	Etalon 0-19	Crvena boja
	<i>B</i>	120,49
	Broj uzoraka <i>n</i>	10
	StdDev <i>B</i>	1,498532
okolina + brazda	Etalon 0-19	Crvena boja
	Novi <i>B</i>	120,71
	Broj uzoraka <i>n</i>	20
	StdDev <i>B</i>	1,458703
	<i>A1</i>	34
	<i>A2</i>	87
	StdDev <i>A1</i>	1,114392
	StdDev <i>A2</i>	1,114392
okolina + brazda + okolina	Etalon 0-19	Crvena boja
	Novi <i>B</i>	120,52
	Broj uzoraka <i>n</i>	30
	StdDev <i>B</i>	1,364738
	<i>A1</i>	35
	<i>A2</i>	86
	StdDev <i>A1</i>	1,800583
	StdDev <i>A2</i>	1,800583

Tablica 10. Crvena boja 0-21 rezultati

okolina	Etalon 0-21	Crvena boja
	<i>B</i>	119,55
	Broj uzoraka <i>n</i>	11
	StdDev <i>B</i>	1,602634
okolina + brazda	Etalon 0-21	Crvena boja
	Novi <i>B</i>	119,97
	Broj uzoraka <i>n</i>	22
	StdDev <i>B</i>	1,613671
	<i>A1</i>	27
	<i>A2</i>	93
	StdDev <i>A1</i>	2,827764
	StdDev <i>A2</i>	2,827764
okolina + brazda + okolina	Etalon 0-21	Crvena boja
	Novi <i>B</i>	119,7
	Broj uzoraka <i>n</i>	33
	StdDev <i>B</i>	1,595668
	<i>A1</i>	28
	<i>A2</i>	92
	StdDev <i>A1</i>	3,602324
	StdDev <i>A2</i>	3,602324

Tablica 11. Crvena boja 0-21 rezultati

okolina	Etalon 0-21	Crvena boja
	<i>B</i>	119,55
	Broj uzoraka <i>n</i>	11
	StdDev <i>B</i>	1,602634
okolina + brazda	Etalon 0-21	Crvena boja
	Novi <i>B</i>	119,97
	Broj uzoraka <i>n</i>	22
	StdDev <i>B</i>	1,613671
	<i>A1</i>	27
	<i>A2</i>	93
	StdDev <i>A1</i>	2,827764
	StdDev <i>A2</i>	2,827764
okolina + brazda + okolina	Etalon 0-21	Crvena boja
	Novi <i>B</i>	119,7
	Broj uzoraka <i>n</i>	33
	StdDev <i>B</i>	1,595668
	<i>A1</i>	28
	<i>A2</i>	92
	StdDev <i>A1</i>	3,602324
	StdDev <i>A2</i>	3,602324

Tablica 12. Crvena boja 0-24 rezultati

okolina	Etalon 0-24	Crvena boja
	<i>B</i>	120,11
	Broj uzoraka <i>n</i>	10
	StdDev <i>B</i>	2,360864
okolina + brazda	Etalon 0-24	Crvena boja
	Novi <i>B</i>	121,57
	Broj uzoraka <i>n</i>	20
	StdDev <i>B</i>	3,895009
	<i>A1</i>	34
	<i>A2</i>	86
	StdDev <i>A1</i>	8,758275
	StdDev <i>A2</i>	8,758275
okolina + brazda + okolina	Etalon 0-24	Crvena boja
	Novi <i>B</i>	120,8
	Broj uzoraka <i>n</i>	30
	StdDev <i>B</i>	3,501718
	<i>A1</i>	34
	<i>A2</i>	87
	StdDev <i>A1</i>	12,83055
	StdDev <i>A2</i>	12,83055

Tablica 13. Crvena boja G1 rezultati

okolina	Etalon G1	Crvena boja
	<i>B</i>	111,89
	Broj uzoraka <i>n</i>	11
	StdDev <i>B</i>	4,740461
okolina + brazda	Etalon G1	Crvena boja
	Novi <i>B</i>	111,65
	Broj uzoraka <i>n</i>	22
	StdDev <i>B</i>	3,380749
	<i>A1</i>	5
	<i>A2</i>	107
	StdDev <i>A1</i>	3,317905
	StdDev <i>A2</i>	3,317905
okolina + brazda + okolina	Etalon G1	Crvena boja
	Novi <i>B</i>	111,5
	Broj uzoraka <i>n</i>	33
	StdDev <i>B</i>	4,292374
	<i>A1</i>	5
	<i>A2</i>	106
	StdDev <i>A1</i>	3,3734
	StdDev <i>A2</i>	3,3734

Tablica 14. Crvena boja G2 - rezultati

okolina	Etalon G2	Crvena boja
	<i>B</i>	111,51
	Broj uzoraka <i>n</i>	11
	StdDev <i>B</i>	1,312088
okolina + brazda	Etalon G2	Crvena boja
	Novi <i>B</i>	111,53
	Broj uzoraka <i>n</i>	22
	StdDev <i>B</i>	1,029927
	<i>A1</i>	16
	<i>A2</i>	96
	StdDev <i>A1</i>	0,9902391
	StdDev <i>A2</i>	0,9902391
okolina + brazda + okolina	Etalon G2	Crvena boja
	Novi <i>B</i>	111,57
	Broj uzoraka <i>n</i>	33
	StdDev <i>B</i>	1,472863
	<i>A1</i>	9
	<i>A2</i>	103
	StdDev <i>A1</i>	7,18283
	StdDev <i>A2</i>	7,18283

Renishaw laser - crvena boja

Tablica 15. Renishaw laser 0-6 rezultati

okolina	Etalon 0-6	Renishaw laser
	<i>B</i>	119,65
	Broj uzoraka <i>n</i>	11
	StdDev <i>B</i>	1,549984
okolina + brazda	Etalon 0-6	Renishaw laser
	Novi <i>B</i>	120,37
	Broj uzoraka <i>n</i>	22
	StdDev <i>B</i>	1,600431
	<i>A1</i>	3
	<i>A2</i>	117
	StdDev <i>A1</i>	1,637018
	StdDev <i>A2</i>	1,637018
okolina + brazda + okolina	Etalon 0-6	Renishaw laser
	Novi <i>B</i>	120,08
	Broj uzoraka <i>n</i>	33
	StdDev <i>B</i>	1,494057
	<i>A1</i>	3
	<i>A2</i>	117
	StdDev <i>A1</i>	2,374043
	StdDev <i>A2</i>	2,374043

Tablica 16. Renishaw laser 0-8 rezultati

okolina	Etalon 0-8	Renishaw laser
	<i>B</i>	101.02
	Broj uzoraka <i>n</i>	7
	StdDev <i>B</i>	1,166513
okolina + brazda	Etalon 0-8	Renishaw laser
	Novi <i>B</i>	101,95
	Broj uzoraka <i>n</i>	14
	StdDev <i>B</i>	2,099177
	<i>A1</i>	34
	<i>A2</i>	67
	StdDev <i>A1</i>	2,927481
	StdDev <i>A2</i>	2,927481
okolina + brazda + okolina	Etalon 0-8	Renishaw laser
	Novi <i>B</i>	101,32
	Broj uzoraka <i>n</i>	21
	StdDev <i>B</i>	1,970364
	<i>A1</i>	31
	<i>A2</i>	71
	StdDev <i>A1</i>	8,612678
	StdDev <i>A2</i>	8,612678

Tablica 17. Renishaw laser 0-17 rezultati

okolina	Etalon 0-17	Renishaw laser
	<i>B</i>	120,77
	Broj uzoraka <i>n</i>	11
	StdDev <i>B</i>	1,31523
okolina + brazda	Etalon 0-17	Renishaw laser
	Novi <i>B</i>	120,73
	Broj uzoraka <i>n</i>	22
	StdDev <i>B</i>	1,256384
	<i>A1</i>	23
	<i>A2</i>	98
	StdDev <i>A1</i>	1,03034
	StdDev <i>A2</i>	1,03034
okolina + brazda + okolina	Etalon 0-17	Renishaw laser
	Novi <i>B</i>	120,68
	Broj uzoraka <i>n</i>	33
	StdDev <i>B</i>	1,114049
	<i>A1</i>	20
	<i>A2</i>	100
	StdDev <i>A1</i>	4,467653
	StdDev <i>A2</i>	4,467653

Tablica 18. Renishaw laser 0-19 rezultati

okolina	Etalon 0-19	Renishaw laser
	<i>B</i>	108,35
	Broj uzoraka <i>n</i>	10
	StdDev <i>B</i>	0,5902196
okolina + brazda	Etalon 0-19	Renishaw laser
	Novi <i>B</i>	108,38
	Broj uzoraka <i>n</i>	20
	StdDev <i>B</i>	0,5331412
	<i>A1</i>	32
	<i>A2</i>	76
	StdDev <i>A1</i>	0,494464
	StdDev <i>A2</i>	0,494464
okolina + brazda + okolina	Etalon 0-19	Renishaw laser
	Novi <i>B</i>	108,26
	Broj uzoraka <i>n</i>	30
	StdDev <i>B</i>	0,6820486
	<i>A1</i>	31
	<i>A2</i>	77
	StdDev <i>A1</i>	1,692624
	StdDev <i>A2</i>	1,692624

Tablica 19. Renishaw laser 0-21 rezultati

okolina	Etalon 0-21	Renishaw laser
	<i>B</i>	119,8
	Broj uzoraka <i>n</i>	11
	StdDev <i>B</i>	1.10607
okolina + brazda	Etalon 0-21	Renishaw laser
	Novi <i>B</i>	120,14
	Broj uzoraka <i>n</i>	22
	StdDev <i>B</i>	1,616685
	<i>A1</i>	31
	<i>A2</i>	89
	StdDev <i>A1</i>	3,482471
	StdDev <i>A2</i>	3,482471
okolina + brazda + okolina	Etalon 0-21	Renishaw laser
	Novi <i>B</i>	119,85
	Broj uzoraka <i>n</i>	33
	StdDev <i>B</i>	1,541678
	<i>A1</i>	28
	<i>A2</i>	92
	StdDev <i>A1</i>	4,804324
	StdDev <i>A2</i>	4,804324

Tablica 20. Renishaw laser 0-24 rezultati

okolina	Etalon 0-24	Renishaw laser
	<i>B</i>	120,03
	Broj uzoraka <i>n</i>	10
	StdDev <i>B</i>	1,444643
okolina + brazda	Etalon 0-24	Renishaw laser
	Novi <i>B</i>	121,61
	Broj uzoraka <i>n</i>	20
	StdDev <i>B</i>	2,478192
	<i>A1</i>	33
	<i>A2</i>	87
	StdDev <i>A1</i>	8,960371
	StdDev <i>A2</i>	8,960371
okolina + brazda + okolina	Etalon 0-24	Renishaw laser
	Novi <i>B</i>	120,94
	Broj uzoraka <i>n</i>	30
	StdDev <i>B</i>	2,355345
	<i>A1</i>	36
	<i>A2</i>	86
	StdDev <i>A1</i>	10,37318
	StdDev <i>A2</i>	10,37318

Izvor svijetlosti: Edmund Optics, 5-Color Tunable Helium-Neon Laser - zelena boja

Tablica 21. Zelena boja 0-6 rezultati

okolina	Etalon 0-6	Zelena boja
	<i>B</i>	102,07
	Broj uzoraka <i>n</i>	12
	StdDev <i>B</i>	1,869105
okolina + brazda	Etalon 0-6	Zelena boja
	Novi <i>B</i>	102,69
	Broj uzoraka <i>n</i>	24
	StdDev <i>B</i>	1,806811
	<i>A1</i>	20
	<i>A2</i>	82
	StdDev <i>A1</i>	3,385482
	StdDev <i>A2</i>	3,385482
okolina + brazda + okolina	Etalon 0-6	Zelena boja
	Novi <i>B</i>	102,43
	Broj uzoraka <i>n</i>	36
	StdDev <i>B</i>	1,612074
	<i>A1</i>	20
	<i>A2</i>	83
	StdDev <i>A1</i>	3,959079
	StdDev <i>A2</i>	3,959079

Tablica 22. Zelena boja 0-8 rezultati

okolina	Etalon 0-8	Zelena boja
	<i>B</i>	102,98
	Broj uzoraka <i>n</i>	13
	StdDev <i>B</i>	2,392536
okolina + brazda	Etalon 0-8	zelena boja
	Novi <i>B</i>	103,09
	Broj uzoraka <i>n</i>	26
	StdDev <i>B</i>	1,833905
	<i>A1</i>	22
	<i>A2</i>	81
	StdDev <i>A1</i>	1,596037
	StdDev <i>A2</i>	1,596037
okolina + brazda + okolina	Etalon 0-8	Zelena boja
	Novi <i>B</i>	103,04
	Broj uzoraka <i>n</i>	39
	StdDev <i>B</i>	2,870624
	<i>A1</i>	20
	<i>A2</i>	83
	StdDev <i>A1</i>	4,857529
	StdDev <i>A2</i>	4,857529

Tablica 23. Zelena boja 0-17 rezultati

okolina	Etalon 0-17	Zelena boja
	<i>B</i>	103,56
	Broj uzoraka <i>n</i>	12
	StdDev <i>B</i>	2,054299
okolina + brazda	Etalon 0-17	Zelena boja
	Novi <i>B</i>	103,32
	Broj uzoraka <i>n</i>	24
	StdDev <i>B</i>	1,721312
	<i>A1</i>	22
	<i>A2</i>	82
	StdDev <i>A1</i>	1,135706
	StdDev <i>A2</i>	1,135706
okolina + brazda + okolina	Etalon 0-17	Zelena boja
	Novi <i>B</i>	103,19
	Broj uzoraka <i>n</i>	36
	StdDev <i>B</i>	1,474493
	<i>A1</i>	20
	<i>A2</i>	83
	StdDev <i>A1</i>	4,115674
	StdDev <i>A2</i>	4,115674

Tablica 24. Zelena boja 0-19 rezultati

okolina	Etalon 0-19	Zelena boja
	<i>B</i>	103,19
	Broj uzoraka <i>n</i>	12
	StdDev <i>B</i>	0,8381102
okolina + brazda	Etalon 0-19	Zelena boja
	Novi <i>B</i>	103,16
	Broj uzoraka <i>n</i>	24
	StdDev <i>B</i>	0,9435703
	<i>A1</i>	17
	<i>A2</i>	86
	StdDev <i>A1</i>	1,045286
	StdDev <i>A2</i>	1,045286
okolina + brazda + okolina	Etalon 0-19	Zelena boja
	Novi <i>B</i>	103,03
	Broj uzoraka <i>n</i>	36
	StdDev <i>B</i>	0,9211677
	<i>A1</i>	17
	<i>A2</i>	86
	StdDev <i>A1</i>	1,711149
	StdDev <i>A2</i>	1,711149

Tablica 25. Zelena boja 0-21 rezultati

okolina	Etalon 0-21	Zelena boja
	<i>B</i>	102,4
	Broj uzoraka <i>n</i>	13
	StdDev <i>B</i>	1,396294
okolina + brazda	Etalon 0-21	Zelena boja
	Novi <i>B</i>	102,6
	Broj uzoraka <i>n</i>	25
	StdDev <i>B</i>	1,416625
	<i>A1</i>	26
	<i>A2</i>	77
	StdDev <i>A1</i>	2,342322
	StdDev <i>A2</i>	2,342322
okolina + brazda + okolina	Etalon 0-21	Zelena boja
	Novi <i>B</i>	102,3
	Broj uzoraka <i>n</i>	38
	StdDev <i>B</i>	1,475419
	<i>A1</i>	25
	<i>A2</i>	78
	StdDev <i>A1</i>	5,212043
	StdDev <i>A2</i>	5,212043

Tablica 26. Zelena boja G2 rezultati

okolina	Etalon G2	Zelena boja
	<i>B</i>	95,22
	Broj uzoraka <i>n</i>	13
	StdDev <i>B</i>	0,8895198
okolina + brazda	Etalon G2	Zelena boja
	Novi <i>B</i>	95,16
	Broj uzoraka <i>n</i>	26
	StdDev <i>B</i>	0,8790376
	<i>A1</i>	31
	<i>A2</i>	65
	StdDev <i>A1</i>	1,392885
	StdDev <i>A2</i>	1,392885
okolina + brazda + okolina	Etalon G2	Zelena boja
	Novi <i>B</i>	95,26
	Broj uzoraka <i>n</i>	39
	StdDev <i>B</i>	1,100552
	<i>A1</i>	38
	<i>A2</i>	57
	StdDev <i>A1</i>	7,856507
	StdDev <i>A2</i>	7,856507

Izvor svijetlosti: Edmund Optics, 5-Color Tunable Helium-Neon Laser - žuta boja

Tablica 27. Žuta boja 0-6 rezultati

okolina	Etalon 0-6	Žuta boja
	<i>B</i>	112,2
	Broj uzoraka <i>n</i>	11
	StdDev <i>B</i>	2,809243
okolina + brazda	Etalon 0-6	Žuta boja
	Novi <i>B</i>	112,74
	Broj uzoraka <i>n</i>	22
	StdDev <i>B</i>	2,24272
	<i>A1</i>	32
	<i>A2</i>	80
	StdDev <i>A1</i>	2,132417
	StdDev <i>A2</i>	2,132417
okolina + brazda + okolina	Etalon 0-6	Žuta boja
	Novi <i>B</i>	112,51
	Broj uzoraka <i>n</i>	33
	StdDev <i>B</i>	2,009027
	<i>A1</i>	34
	<i>A2</i>	79
	StdDev <i>A1</i>	3,877879
	StdDev <i>A2</i>	3,877879

Tablica 28. Žuta boja 0-17 rezultati

okolina	Etalon 0-17	Žuta boja
	<i>B</i>	112,21
	Broj uzoraka <i>n</i>	12
	StdDev <i>B</i>	5,510462
okolina + brazda	Etalon 0-17	Žuta boja
	Novi <i>B</i>	112,6
	Broj uzoraka <i>n</i>	23
	StdDev <i>B</i>	4,080394
	<i>A1</i>	25
	<i>A2</i>	87
	StdDev <i>A1</i>	3,198569
	StdDev <i>A2</i>	3,198569
okolina + brazda + okolina	Etalon 0-17	Žuta boja
	Novi <i>B</i>	112,68
	Broj uzoraka <i>n</i>	35
	StdDev <i>B</i>	3,358888
	<i>A1</i>	22
	<i>A2</i>	91
	StdDev <i>A1</i>	5,773213
	StdDev <i>A2</i>	5,773213

Tablica 29. Žuta boja 0-19 rezultati

okolina	Etalon 0-19	Žuta boja
	<i>B</i>	113,02
	Broj uzoraka <i>n</i>	11
	StdDev <i>B</i>	1,287199
okolina + brazda	Etalon 0-19	Žuta boja
	Novi <i>B</i>	113,14
	Broj uzoraka <i>n</i>	22
	StdDev <i>B</i>	1,075768
	<i>A1</i>	27
	<i>A2</i>	86
	StdDev <i>A1</i>	1,557817
	StdDev <i>A2</i>	1,557817
okolina + brazda + okolina	Etalon 0-19	Žuta boja
	Novi <i>B</i>	113,03
	Broj uzoraka <i>n</i>	33
	StdDev <i>B</i>	1,050542
	<i>A1</i>	28
	<i>A2</i>	86
	StdDev <i>A1</i>	1,507282
	StdDev <i>A2</i>	1,507282

Tablica 30. Žuta boja 0-21 rezultati

okolina	Etalon 0-21	Žuta boja
	<i>B</i>	112,14
	Broj uzoraka <i>n</i>	12
	StdDev <i>B</i>	1,423427
okolina + brazda	Etalon 0-21	Žuta boja
	Novi <i>B</i>	112,56
	Broj uzoraka <i>n</i>	24
	StdDev <i>B</i>	2,547887
	<i>A1</i>	4
	<i>A2</i>	108
	StdDev <i>A1</i>	2,882515
	StdDev <i>A2</i>	2,882515
okolina + brazda + okolina	Etalon 0-21	Žuta boja
	Novi <i>B</i>	112,35
	Broj uzoraka <i>n</i>	36
	StdDev <i>B</i>	2,195845
	<i>A1</i>	4
	<i>A2</i>	108
	StdDev <i>A1</i>	2,834927
	StdDev <i>A2</i>	2,834927

Tablica 31. Žuta boja G1 rezultati

okolina	Etalon G1	Žuta boja
	<i>B</i>	104,02
	Broj uzoraka <i>n</i>	12
	StdDev <i>B</i>	2,738144
okolina + brazda	Etalon G1	Žuta boja
	Novi <i>B</i>	104,31
	Broj uzoraka <i>n</i>	24
	StdDev <i>B</i>	2,255867
	<i>A1</i>	4
	<i>A2</i>	100
	StdDev <i>A1</i>	3,10531
	StdDev <i>A2</i>	3,10531
okolina + brazda + okolina	Etalon G1	Žuta boja
	Novi <i>B</i>	104,21
	Broj uzoraka <i>n</i>	36
	StdDev <i>B</i>	2,211938
	<i>A1</i>	12
	<i>A2</i>	92
	StdDev <i>A1</i>	9,570584
	StdDev <i>A2</i>	9,570584

Tablica 32. Žuta boja G2 rezultati

okolina	Etalon G2	Žuta boja
	B	104,67
	Broj uzoraka n	12
	StdDev B	1,305274
okolina + brazda	Etalon G2	Žuta boja
	Novi B	104,62
	Broj uzoraka n	24
	StdDev B	1,207156
	$A1$	9
	$A2$	96
	StdDev $A1$	1,116072
	StdDev $A2$	1,116072
okolina + brazda + okolina	Etalon G2	Žuta boja
	Novi B	104,58
	Broj uzoraka n	36
	StdDev B	1,112292
	$A1$	16
	$A2$	88
	StdDev $A1$	7,519407
	StdDev $A2$	7,519407

7.1.1. Faktori korekcije

Temeljem rezultata mjerenja iz tablica 6. do 32., za B , A_1 i A_2 izmjerene su vrijednosti dubina brazdi mjerenih etalona različitim izvorima svjetla.

Izraz za računanje dubine brazde:

$$d = \left(\frac{n \cdot B + A}{B} \right) \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad \text{nm} \quad (7.1)$$

Na grafovima od slike 56. do 60. prikazan je odnos referente vrijednosti i izmjerene vrijednosti. Temeljem uočenih odstupanja od referentne vrijednosti koje se sa povećanjem nazivne dubine brazde linearno uvećavaju, utvrđen je faktor korekcije d_{kor} . Faktor korekcije je određen iz programa Origin Pro, a on predstavlja koeficijent smjera f_{kor} u jednadžbi pravca pomnožen sa izmjerenom dubinom brazde.

U tablicama 33. do 37. prikazane su referentne, izmjerene i korigirane vrijednosti dubine brazde i razlike Δ_1 i Δ_2 , gdje je:

Δ_1 = razlika između izmjerene dubine brazde i referente dubine brazde u nm,

Δ_2 = razlika između korigirane dubine brazde i referente dubine brazde u nm.

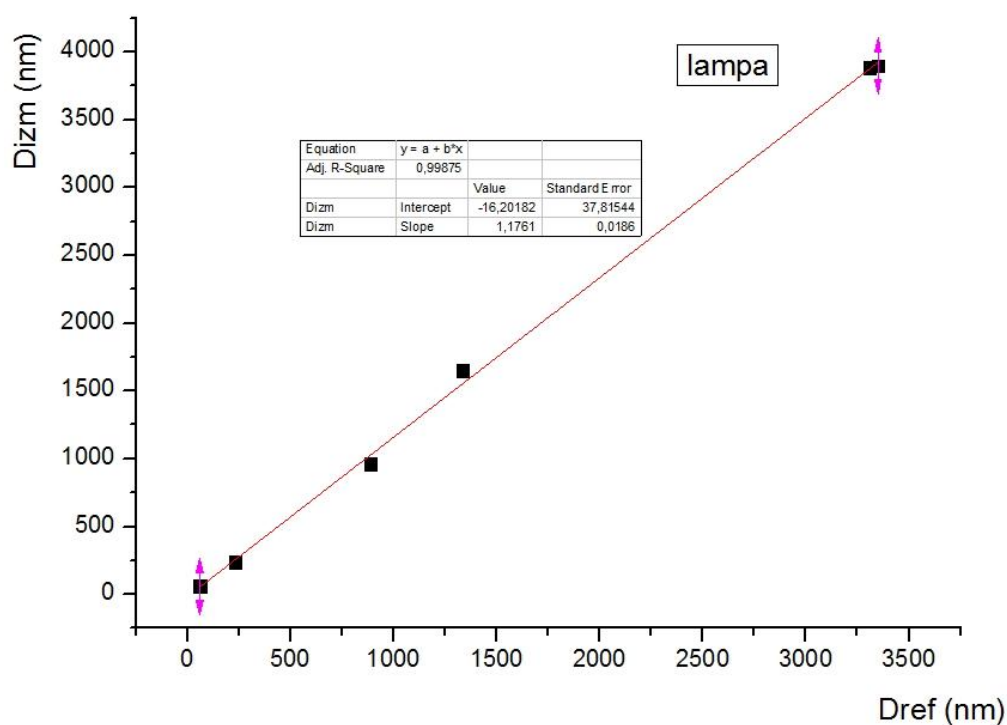
HALOGENA LAMPA

$$d_{kor} = k \cdot d_{izm}, \text{ nm}$$

$$f_{kor} = 1,1761$$

Tablica 33. Halogena lampa - referentne, izmjerene i korigirane vrijednosti dubine brazde

ETALON	$d_{ref}, \text{ nm}$	$d_{izm}, \text{ nm}$	$\Delta_1, \text{ nm}$	$d_{kor}, \text{ nm}$	$\Delta_2, \text{ nm}$
0-17	60	60	0	70,566	10,566
0-19	240	232	-8	272,8552	32,8552
0-21	961	887	-74	1043,2007	82,2007
0-6	1651	1335	-316	1570,0935	-80,9065
0-24	3883	3309	-574	3891,7149	8,7149
0-8	3895	3349	-564	3938,7589	43,7589

**Slika 56. Graf halogena lampa i koeficijent smjera**

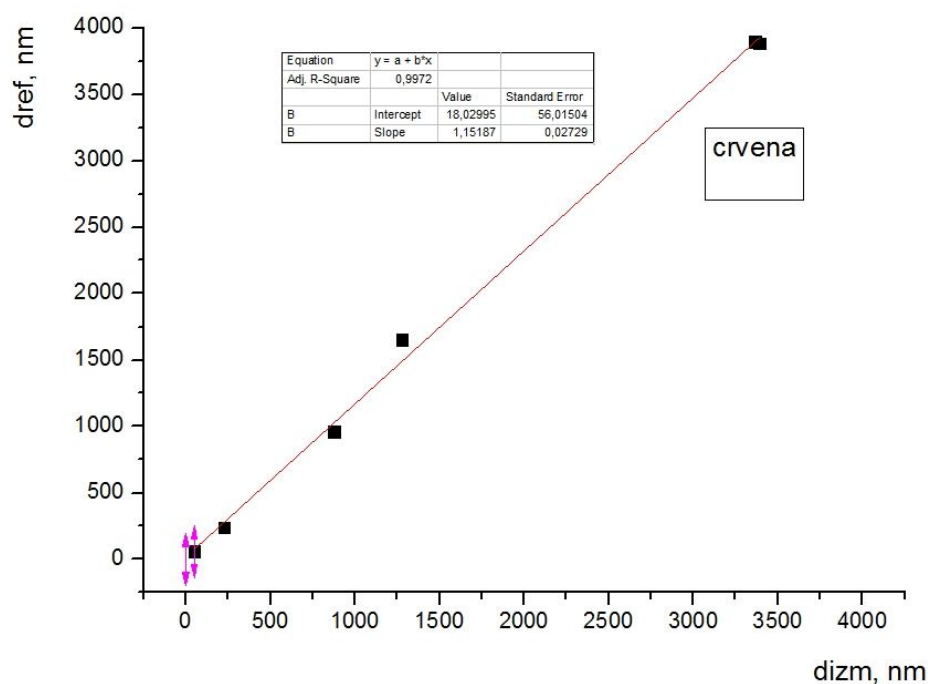
Edmund Optics, 5-Color Tunable Helium-Neon Laser - crvena boja

$$d_{kor} = k \cdot d_{izm}, \text{ nm}$$

$$f_{kor} = 1,15187$$

Tablica 34. Crvena boja - referentne, izmjerene i korigirane vrijednosti dubine brazde

ETALON	d_{ref} , nm	d_{izm} , nm	Δ_1 , nm	d_{kor} , nm	Δ_2 , nm
0-17	60	49,75254	-10,2475	57,30846	-2,69154
0-19	240	225,775	-14,225	260,0634	20,06345
0-21	961	875,9813	-85,0187	1009,017	48,01658
0-6	1651	1278,794	-372,206	1473,004	-177,996
0-24	3883	3391,871	-491,129	3906,994	23,99445
0-8	3895	3364,434	-530,566	3875,391	-19,6094

**Slika 57. Graf- crvena i koeficijent smjera**

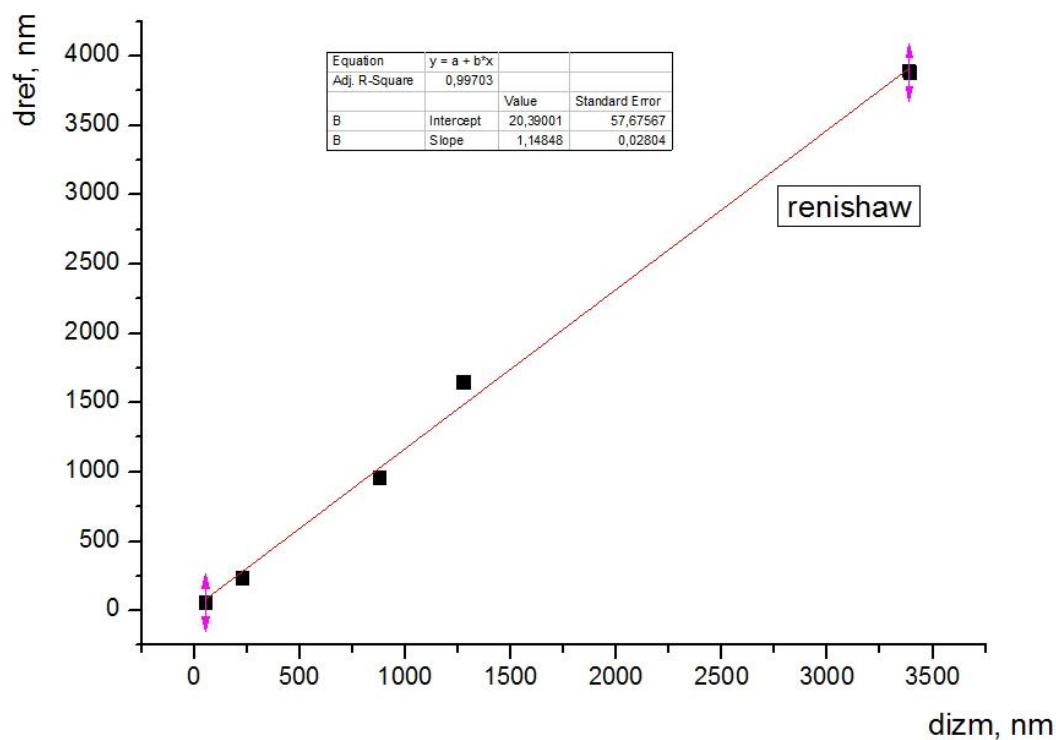
RENISHAW LASER - crvena boja

$$d_{kor} = k \cdot d_{izm}, \text{ nm}$$

$$f_{kor} = 1,14848$$

Tablica 35. Renishaw laser - referentne, izmjerene i korigirane vrijednosti dubine brazde

ETALON	d_{ref} , nm	d_{izm} , nm	Δ_1 , nm	d_{kor} , nm	Δ_2 , nm
0-17	60	52,46319	-7,53681	60,25292	0,252924
0-19	240	225,0397	-14,9603	258,4536	18,45359
0-21	961	875,6769	-85,3232	1005,697	44,69741
0-6	1651	1273,505	-377,495	1462,595	-188,405
0-24	3883	3388,991	-494,009	3892,188	9,188384
0-8	3895	3385,717	-509,283	3888,428	-6,57174

**Slika 58. Graf renishaw laser i koeficijent smjera**

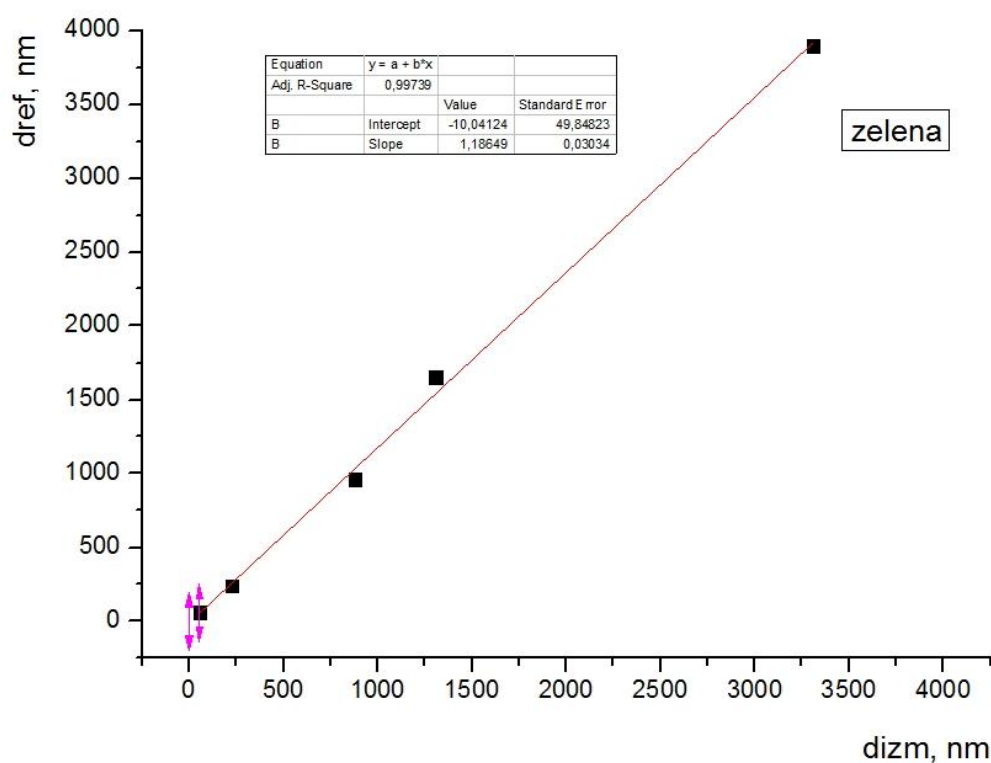
Edmund Optics, 5-Color Tunable Helium-Neon Laser - zelena boja

$$d_{kor} = k \cdot d_{izm}, \text{ nm}$$

$$f_{kor} = 1,18649$$

Tablica 36. Zelena boja - referentne, izmjerene i korigirane vrijednosti dubine brazde

ETALON	$d_{ref}, \text{ nm}$	$d_{izm}, \text{ nm}$	$\Delta_1, \text{ nm}$	$d_{kor}, \text{ nm}$	$\Delta_2, \text{ nm}$
0-17	60	55,25245	-4,74755	65,55648	5,556479
0-19	240	226,6233	-13,3767	268,8863	28,88628
0-21	961	880,849	-80,151	1045,119	84,11853
0-6	1651	1305,999	-345,001	1549,555	-101,445
0-24	3883	-	-	-	-
0-8	3895	3310,698	-584,302	3928,11	33,11007

**Slika 59. Graf zelena boja i koeficijent smjera**

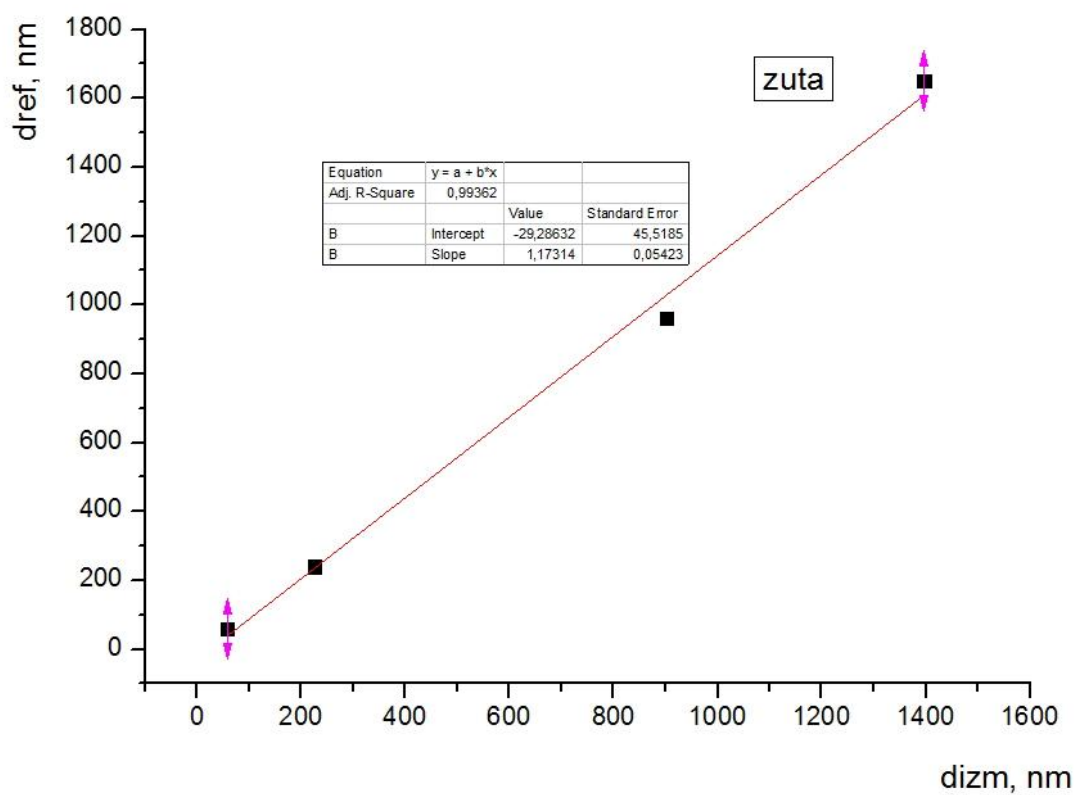
Edmund Optics, 5-Color Tunable Helium-Neon Laser - žuta boja

$$d_{kor} = k \cdot d_{izm}, \text{ nm}$$

$$f_{kor} = 1,17314$$

Tablica 37. Žuta boja - referentne, izmjerene i korigirane vrijednosti dubine brazde

ETALON	d_{ref} , nm	d_{izm} , nm	Δ_1 , nm	d_{kor} , nm	Δ_2 , nm
0-17	60	57,98722	-2,01278	58,36669	-1,63331
0-19	240	225,9754	-14,0246	264,8657	24,86568
0-21	961	901,5741	-59,4259	1027,649	66,6487
0-6	1651	1396,541	-254,459	1847,405	196,4046
0-24	3883	-	-	-	-
0-8	3895	-	-	-	-

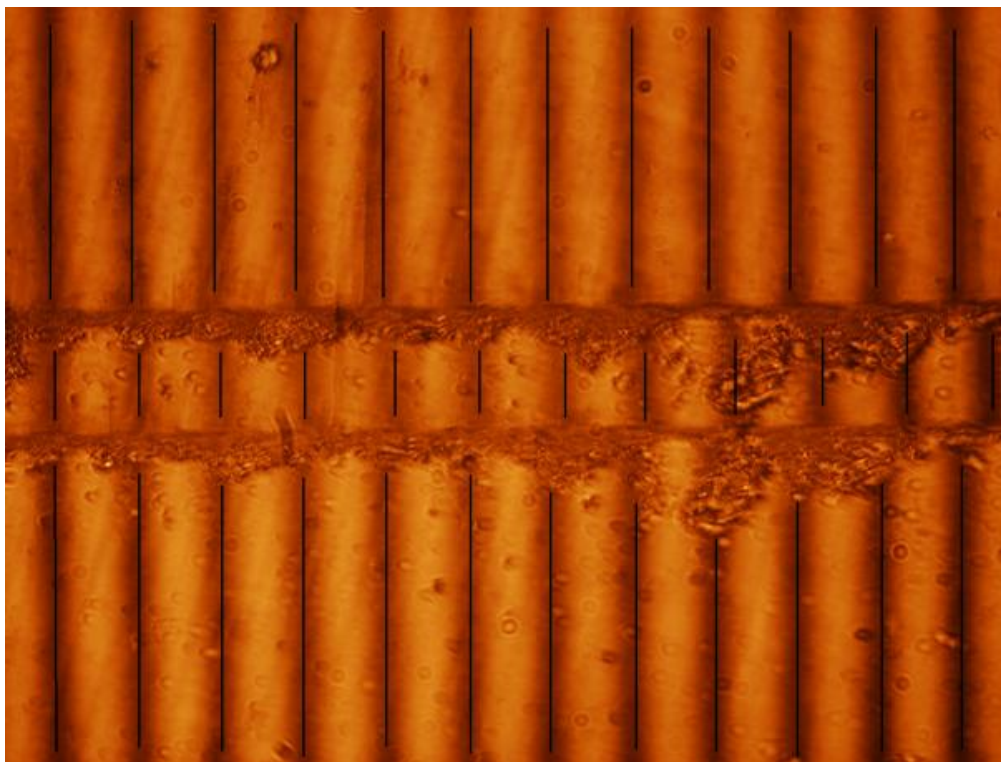
**Slika 60. Graf žuta i koeficijent smjera**

7.2. Utvrđivanje razlika u izmjerenim vrijednostima B

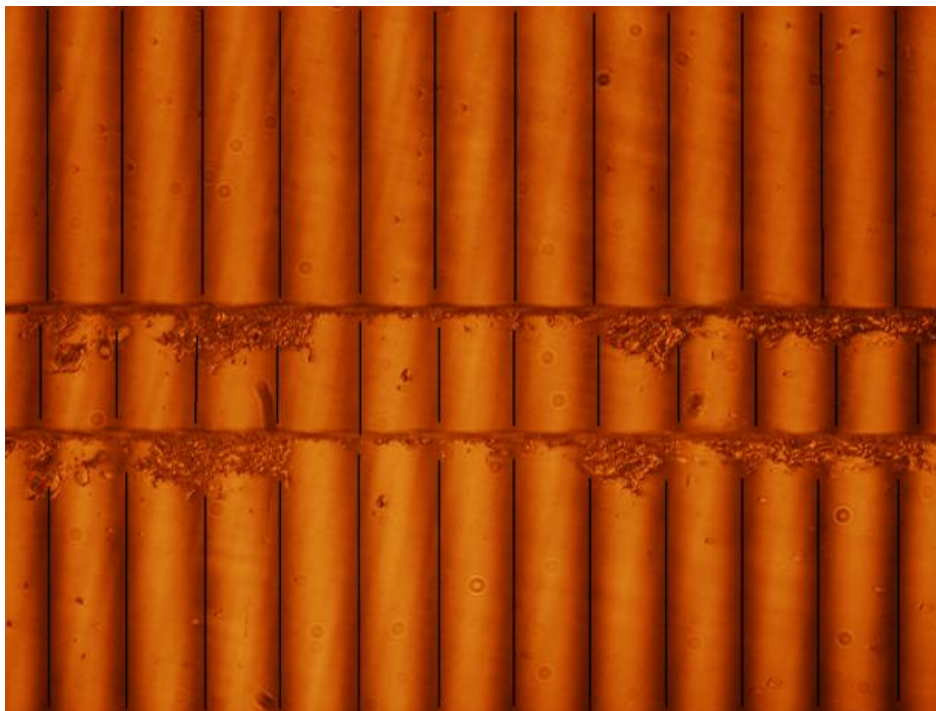
Iz snimljenih interferograma za etalone 0-6, 0-8, 0-24, odnos A_1 , odnosno A_2 u brazdi nije uniforman.

Temeljem toga izvršena je analiza interferograma u programu za analizu slike na način da su analizirane vrijednosti B u okolini, brazdi i okolini 1.

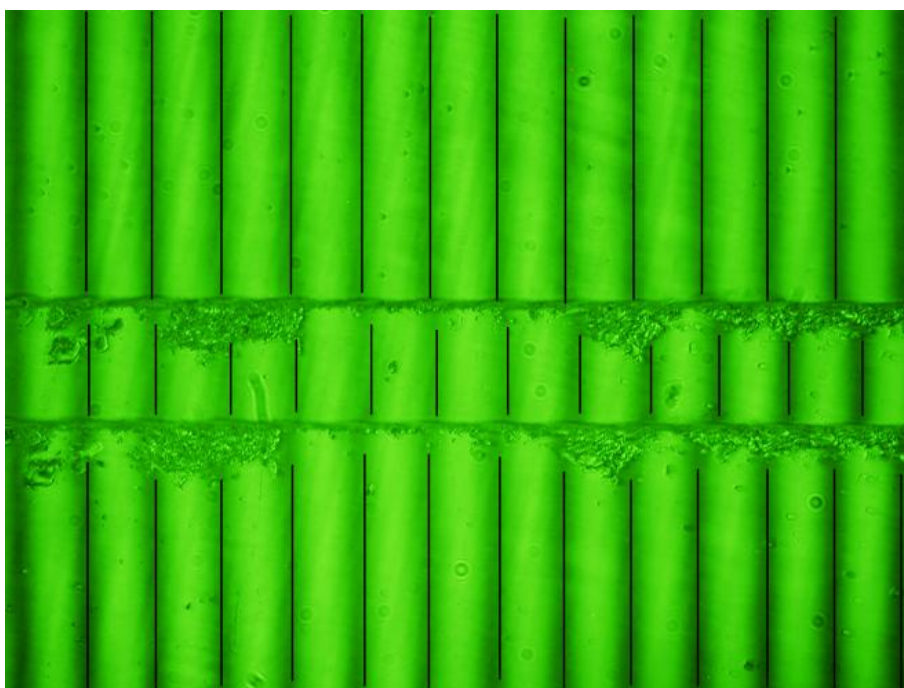
Na etalonima 0-8 i 0-24 sa zelenim izvorom svjetlosti u programu za analizu slike se trebalo posebno učitati okolinu, brazdu i okolinu 1 što se vidi na slikama od 61. do 66. Također, zbog slabe kvalitete interferograma, proizvoljno su povučene crte da bi program lakše očitao rezultate.



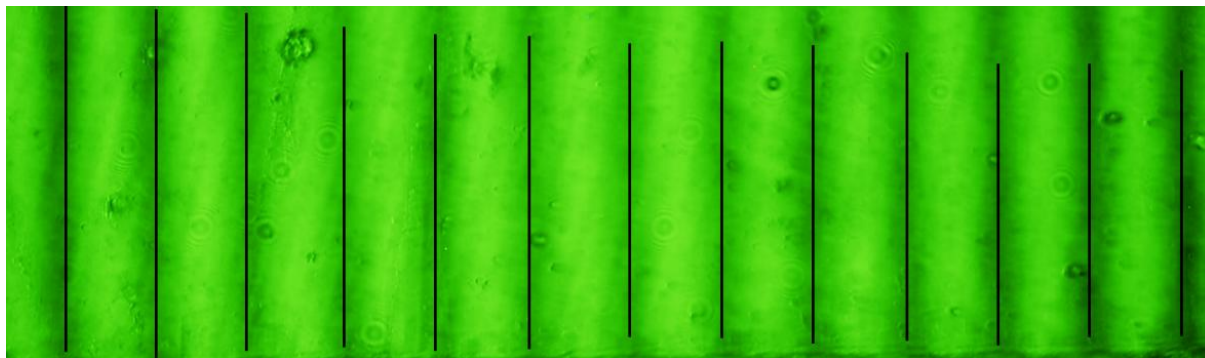
Slika 61. Etalon 0-8 (žuta) sa proizvoljno označenim crtama



Slika 62. Etalon 0-24 (žuta boja) sa proizvoljno označenim crtama



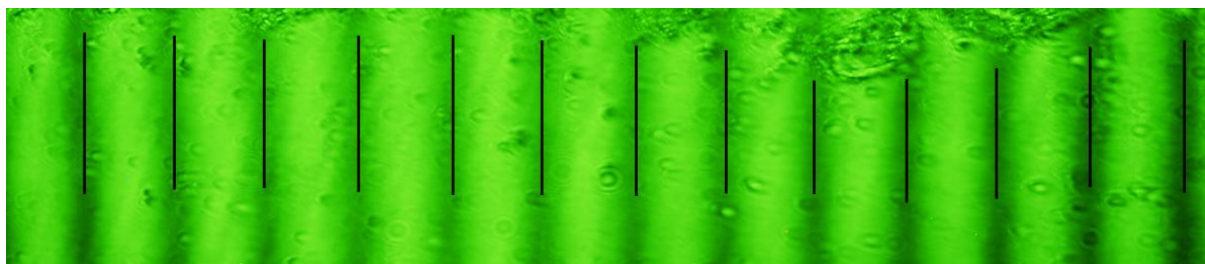
Slika 63. Etalon 0-24 (zelena boja) sa proizvoljno označenim crtama



Slika 64. 0-8 zelena boja - okolina



Slika 65. 0-8 zelena boja - brazda



Slika 66. 0-8 zelena boja - okolina 1

Rezultati analiziranih vrijednosti B u okolini, brazdi i okolini 1 prikazani su u tablicama 38. do 49.

Tablica 38. Crvena boja 0-6 - odnos B i s

CRVENA BOJA			
Etalon 0-6	Broj uzoraka: 11	B	s
	Okolina	119,6	1,909363
	Brazda	121,9	1,02127
	Okolina	119,31	0,5007853

Tablica 39. Crvena boja 0-8 - odnos B i s

CRVENA BOJA			
Etalon 0-8	Broj uzoraka: 11	B	s
	Okolina	119,51	2,062624
	Brazda (10 uzoraka)	123,29	4,131632
	Okolina	118,85	1,11654

Tablica 40. Crvena boja 0-24 - odnos B i s

CRVENA BOJA			
Etalon 0-24	Broj uzoraka: 11	B	s
	Okolina	119,99	2,986862
	Brazda (10 uzoraka)	123,38	2,443273
	Okolina	119,2	1,300467

Tablica 41. Renishaw laser 0-6 - odnos B i s

RENISHAW LASER			
Etalon 0-6	Broj uzoraka: 11	B	s
	Okolina	119,69	1,503705
	Brazda	121,14	4,000617
	Okolina	119,56	3,238162

Tablica 42. Renishaw laser 0-8 - odnos B i s

RENISHAW LASER			
Etalon 0-8	Broj uzoraka: 10	B	s
	Okolina	120,27	3,057002
	Brazda	123,29	7,184339
	Okolina (11 uzoraka)	118,94	1,092462

Tablica 43. Renishaw laser 0-24 - odnos B i s

RENISHAW LASER			
Etalon 0-24	Broj uzoraka: 10	B	s
	Okolina	120,07	1,441909
	Brazda (11 uzoraka)	123,23	2,212449
	Okolina	119,54	1,312668

Tablica 44. Zelena boja 0-6 - odnos B i s

ZELENA BOJA			
Etalon 0-6	Broj uzoraka: 12	B	s
	Okolina	101,83	1,782152
	Brazda	103,41	2,164007
	Okolina	101,55	0,9714323

Tablica 45. Zelena boja 0-8 - odnos B i s

ZELENA BOJA			
Etalon 0-8	Broj uzoraka: 13	B	s
	Okolina	91,45	2,768977
	Brazda	94,74	7,531776
	Okolina	91,37	2,783706

Tablica 46. Zelena boja 0-24 - odnos B i s

ZELENA BOJA			
Etalon 0-24	Broj uzoraka: 12	B	s
	Okolina	91,75	1,715083
	Brazda	94,4	4,37735
	Okolina	90,92	2,966272

Tablica 47. Žuta boja 0-6 - odnos B i s

ŽUTA BOJA			
Etalon 0-6	Broj uzoraka: 11	B	s
	Okolina	112,09	2,019476
	Brazda	113,29	1,304361
	Okolina	111,81	0,955198

Tablica 48. Žuta boja 0-8 - odnos B i s

ŽUTA BOJA			
Etalon 0-8	Broj uzoraka: 12	B	s
	Okolina	112,01	4,240705
	Brazda	115,55	4,753741
	Okolina	111,33	1,167246

Tablica 49. Žuta boja 0-24 - odnos B i s

ŽUTA BOJA			
Etalon 0-24	Broj uzoraka: 11	B	s
	Okolina	111,93	2,362119
	Brazda	115,38	3,04812
	Okolina	111,44	2,063703

Rezultati mjerenja B u okolini se ne razlikuju, no u brazdi su utvrđene veće vrijednosti B za sve izvore svjetla kod sva 3 etalona.

7.3. Analiza interferograma po sekcijama

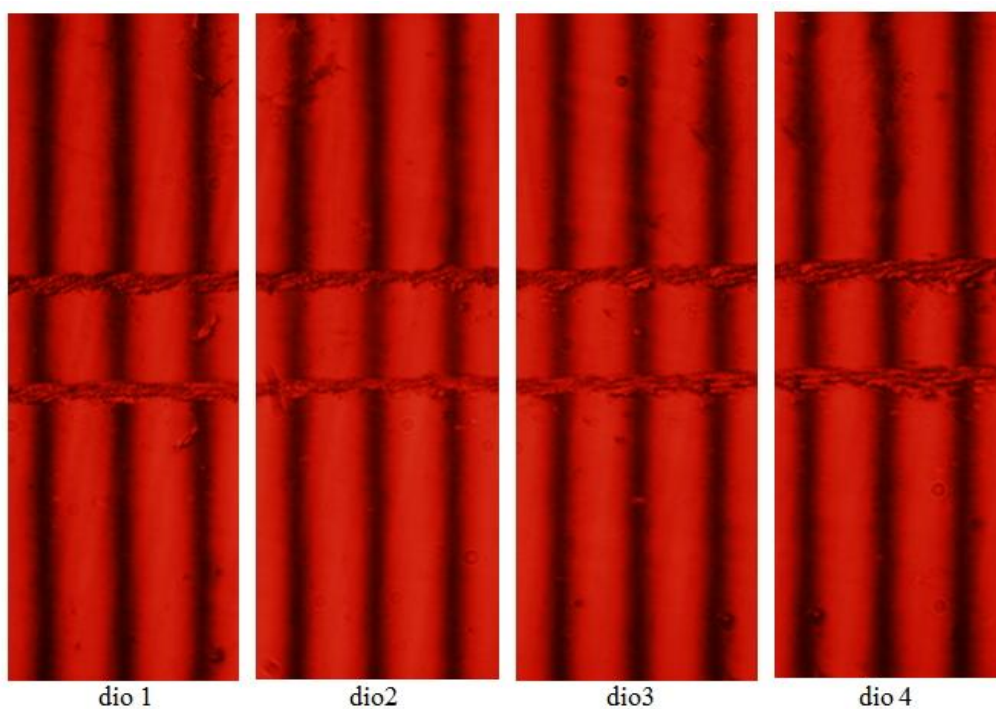
S ciljem utvđivanja utjecaja porasta B u brazdi na rezultate mjerenja dubine brazde, izvršena je analiza interferograma po sekcijama.

Za svaki interferogram uzete su 4 sekcije kao što se vidi na slikama od 67. do 78.

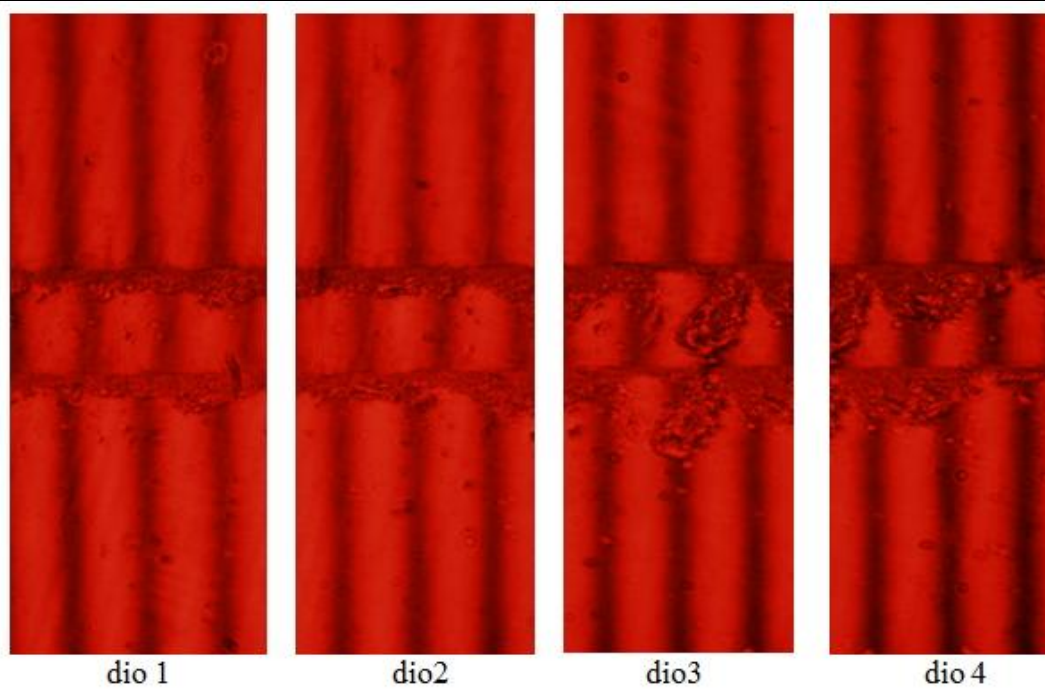
Na nekim mjestim postoje oštećenja mjernih površina koja mogu utjecati na očitavanje B , odnosno ostatak A .

Na etalonima 0-8 i 0-24 snimljene sa zelenim izvorom svjetlosti te 0-8 i 0-24 žuti izvor svjetlosti, na interferogramima su proizvoljno ucrtane crte radi lakšeg prepoznavanja u programu za analizu slike.

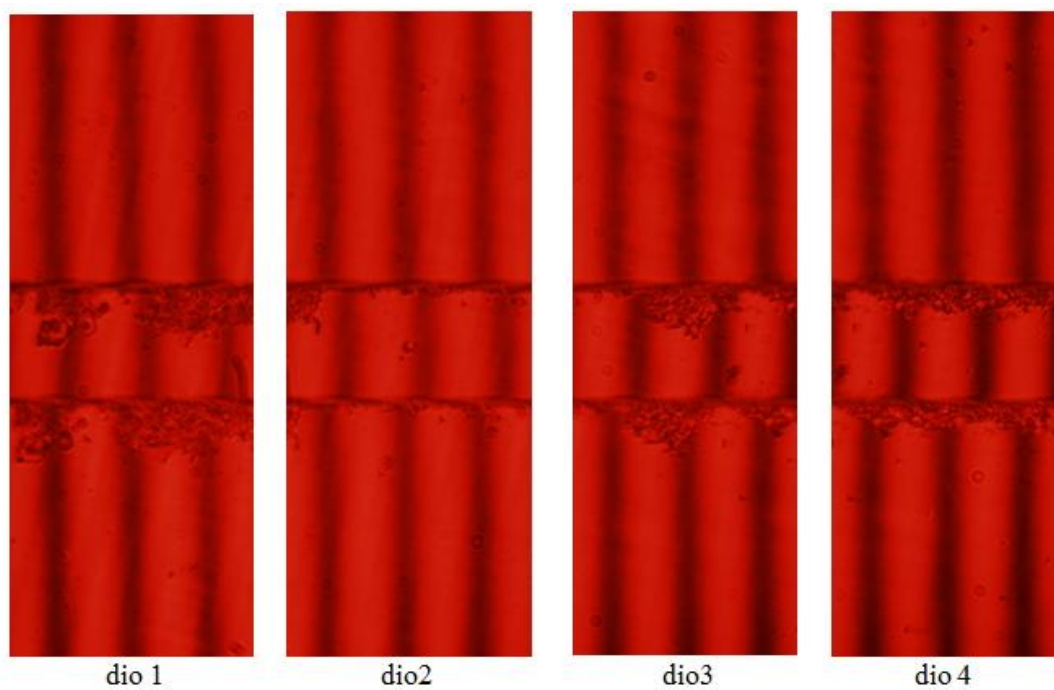
U prilogu 1. vide se u tablicama rezultati mjerenja interferograma po sekcijama.



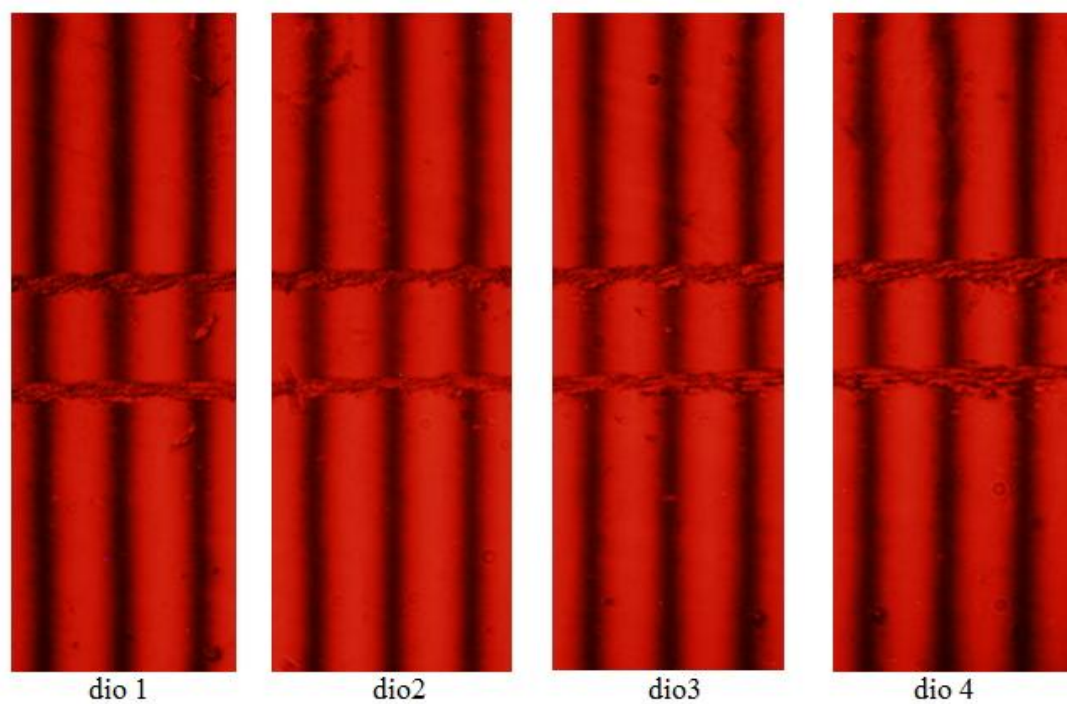
Slika 67. Etalon 0-6 - izvor svjetlosti crvena boja



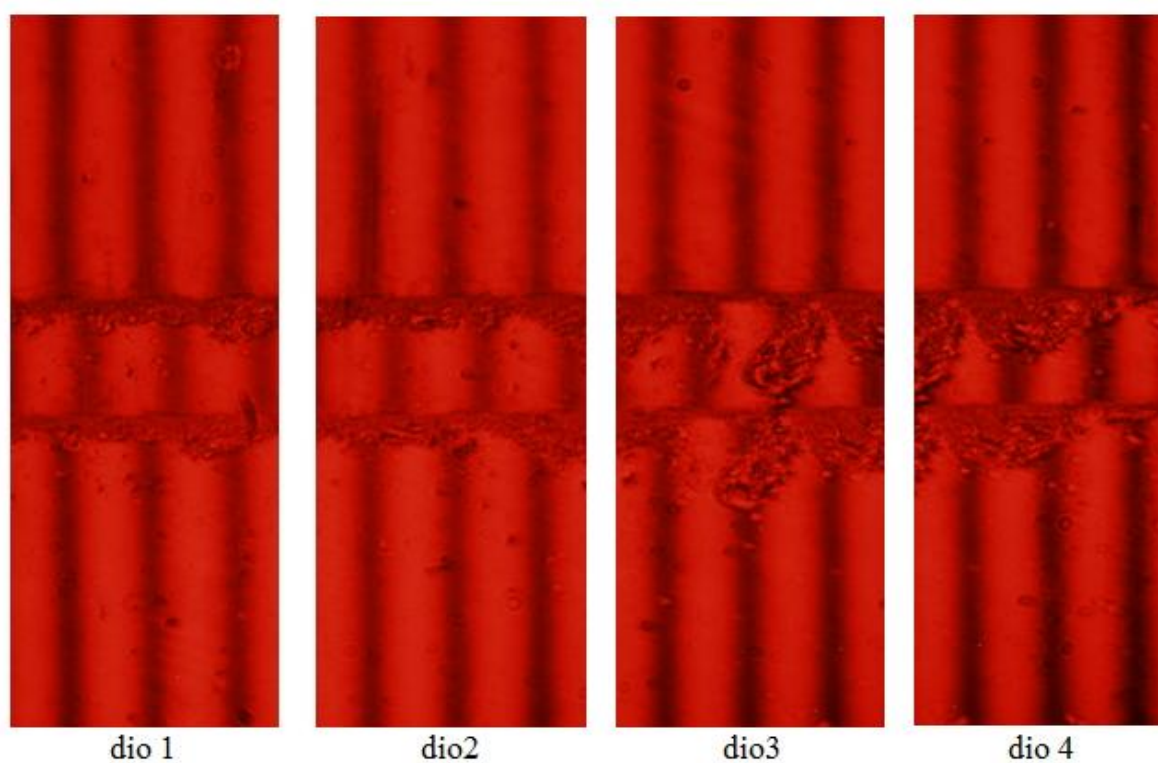
Slika 68. Etalon 0-8 - izvor svjetlosti crvena boja



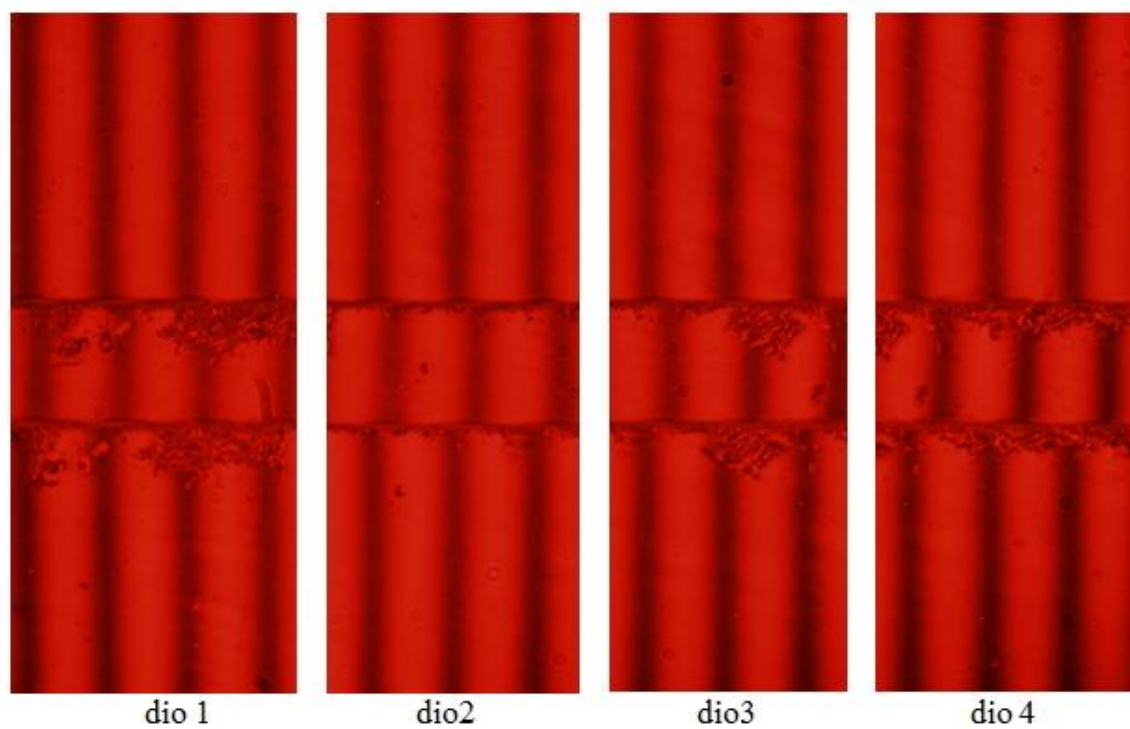
Slika 69. Etalon 0-24 - izvor svjetlosti crvena boja



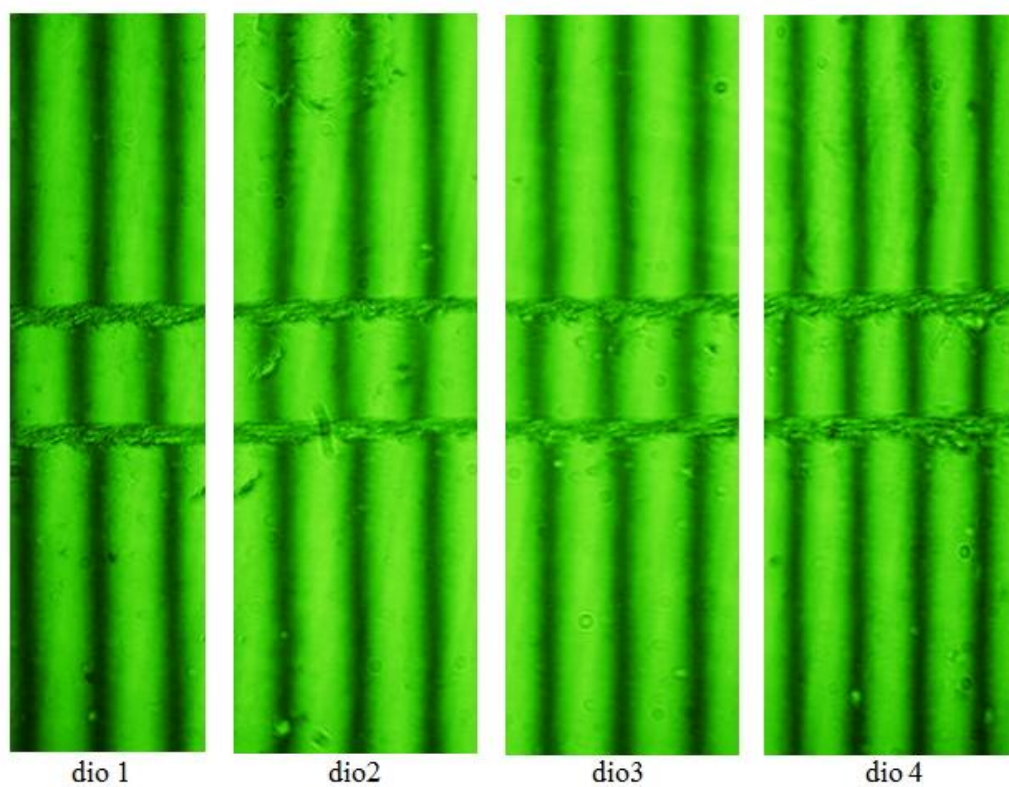
Slika 70. Etalon 0-6 - izvor svjetlosti renishaw laser



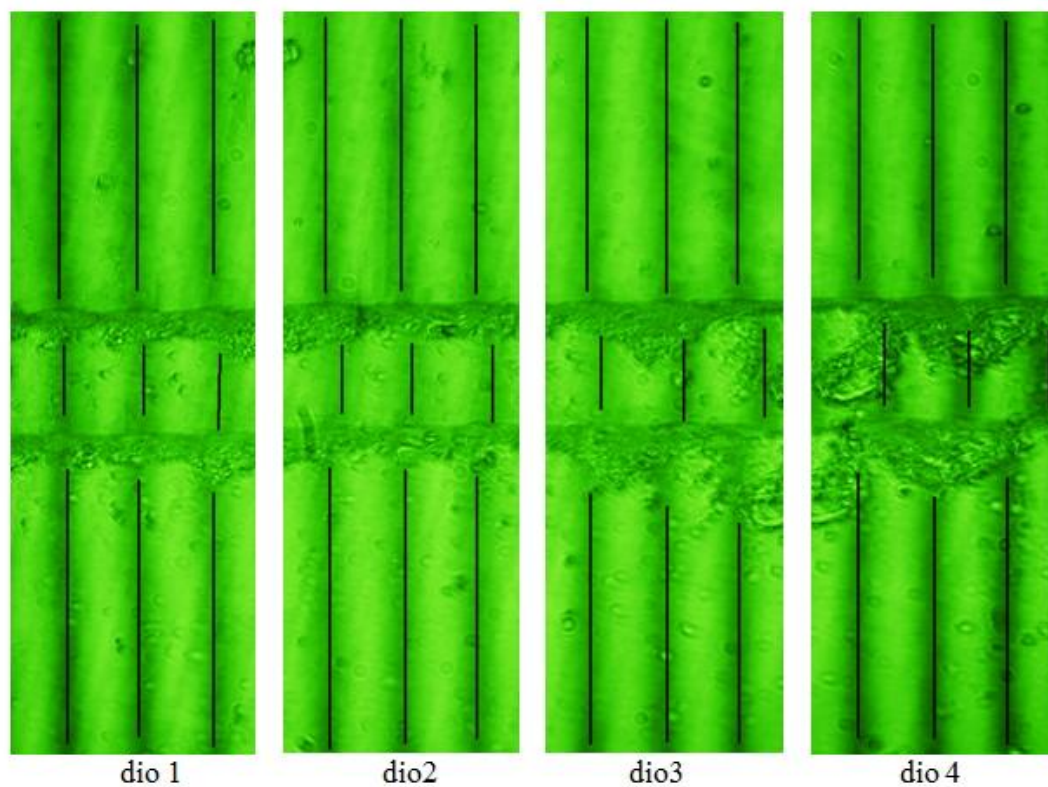
Slika 71. Etalon 0-8 - izvor svjetlosti renishaw laser



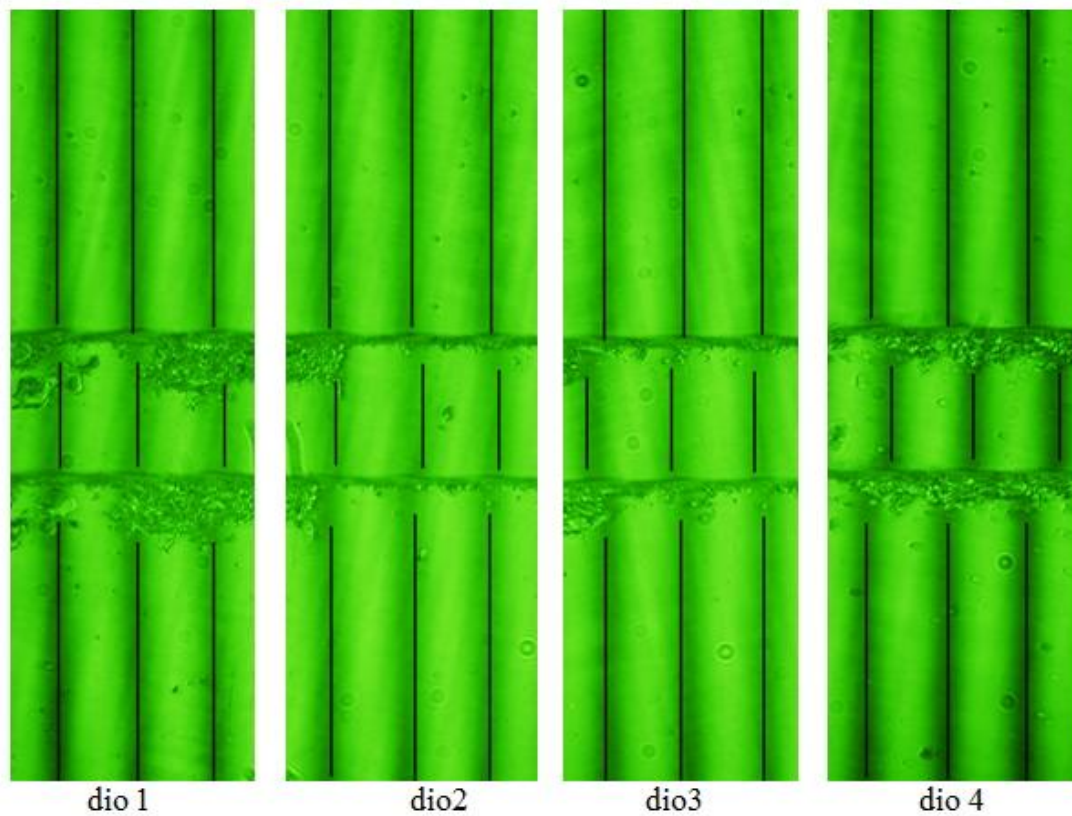
Slika 72. Etalon 0-24 - izvor svjetlosti renishaw



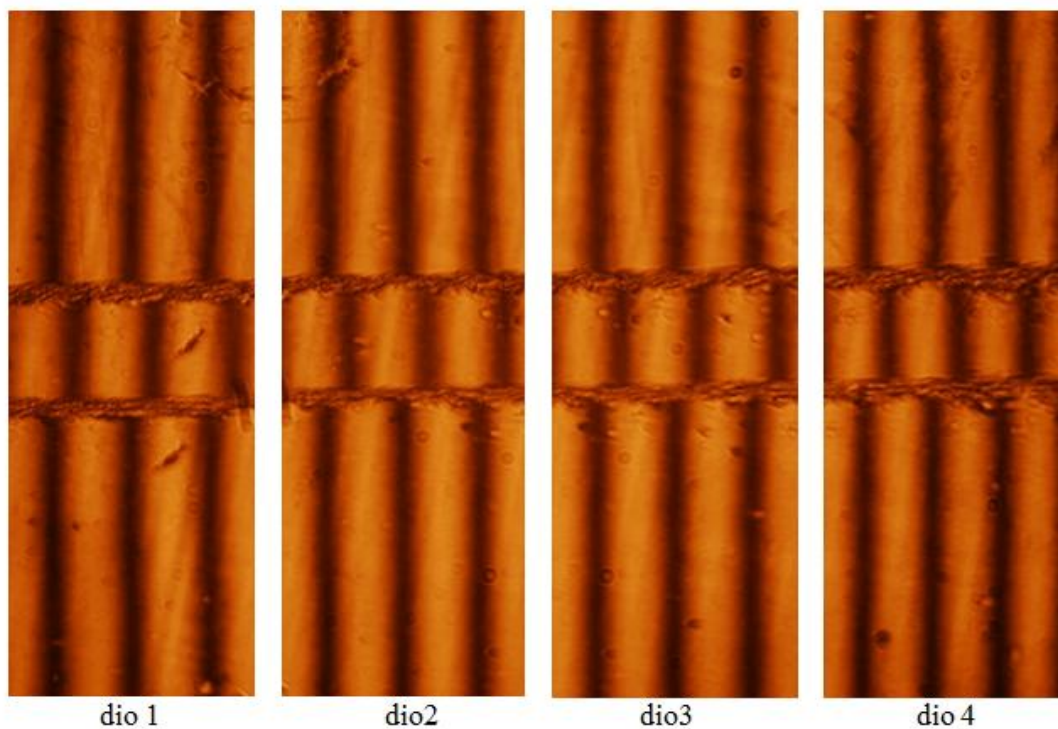
Slika 73. Etalon 0-6 - izvor svjetlosti zelena boja



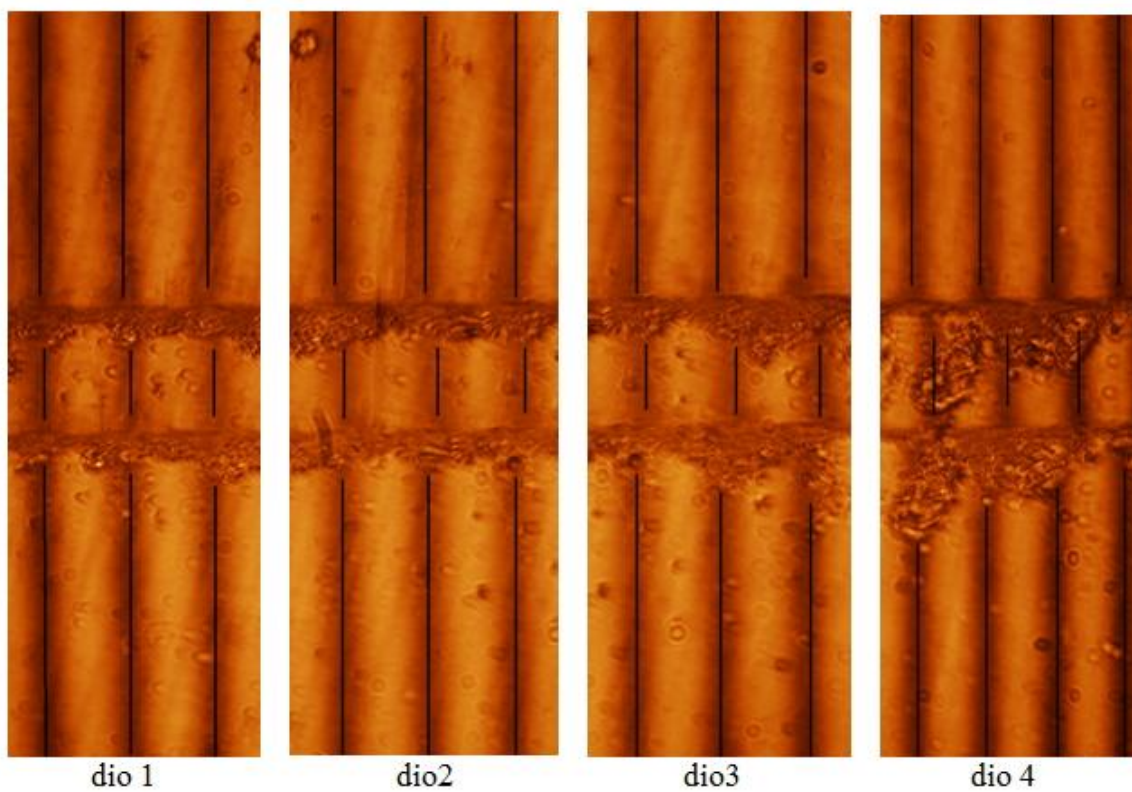
Slika 74. Etalon 0-8 - izvor svjetlosti zelena boja



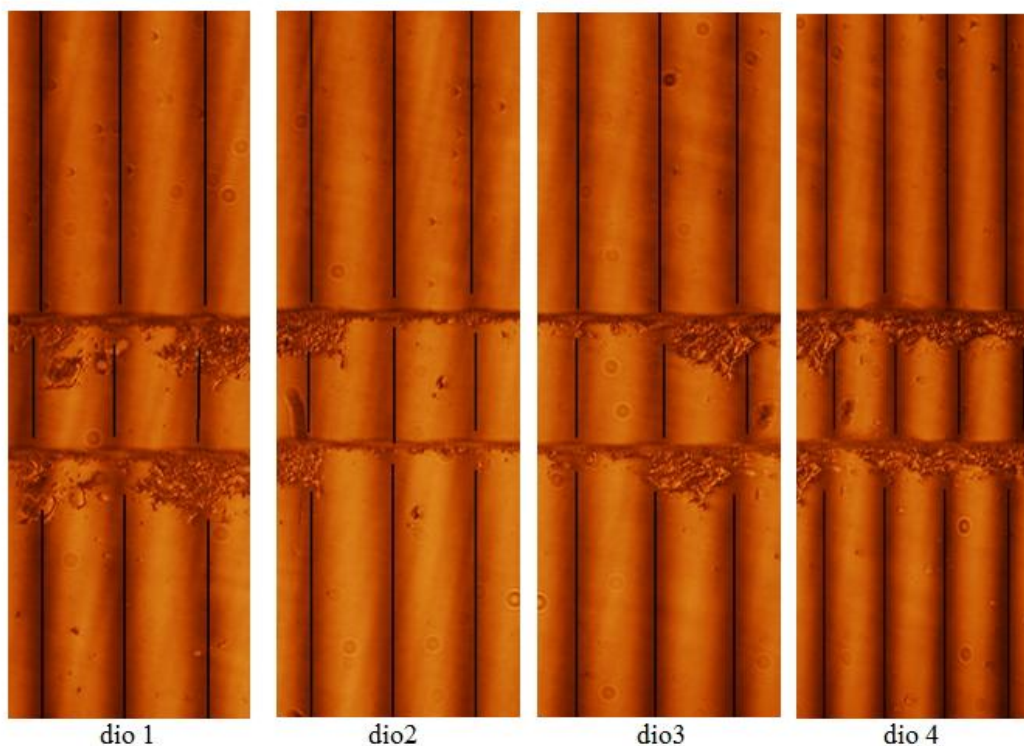
Slika 75. Etalon 0-24 - izvor svjetlosti zelena boja



Slika 76. Etalon 0-6 - izvor svjetlosti žuta boja



Slika 77. Etalon 0-8 - izvor svjetlosti žuta boja



Slika 78. Etalon 0-24 - izvor svjetlosti žuta boja

U tablicama od 50.do 53. vide se rezultati mjerenja A po sekcijama s lijeva na desno koji su uzeti iz tablica u prilogu 1. Podatci za A su važni da se u grafovima vidi kakav je odnos za sva tri etalona kod određenog izvora svjetlosti.

Tablica 50. Vrijednosti A za zeleni izvor svjetlosti

ZELENA BOJA		
Etalon 0-6		A
Dio 1		-24
Dio 2		-20
Dio 3		-18
Dio 4		-13
ZELENA BOJA		
Etalon 0-8		A
Dio 1		7
Dio 2		16
Dio 3		19
Dio 4		20
ZELENA BOJA		
Etalon 0-24		A
Dio 1		4
Dio 2		11
Dio 3		12
Dio 4		24

Tablica 51. Vrijednosti A za žuti izvor svjetlosti

ŽUTA BOJA	
Etalon 0-6	
Dio 1	25
Dio 2	28
Dio 3	29
Dio 4	36
ŽUTA BOJA	
Etalon 0-8	
Dio 1	6
Dio 2	12
Dio 3	16
Dio 4	35

ŽUTA BOJA	
Etalon 0-24	
Dio 1	-3
Dio 2	-1
Dio 3	2
Dio 4	22

Tablica 52. Vrijednosti A za crveni izvor svjetlosti

CRVENA BOJA	
Etalon 0-6	
Dio 1	-6
Dio 2	-1
Dio 3	3
Dio 4	3
CRVENA BOJA	
Etalon 0-8	
Dio 1	35
Dio 2	37
Dio 3	46
Dio 4	40

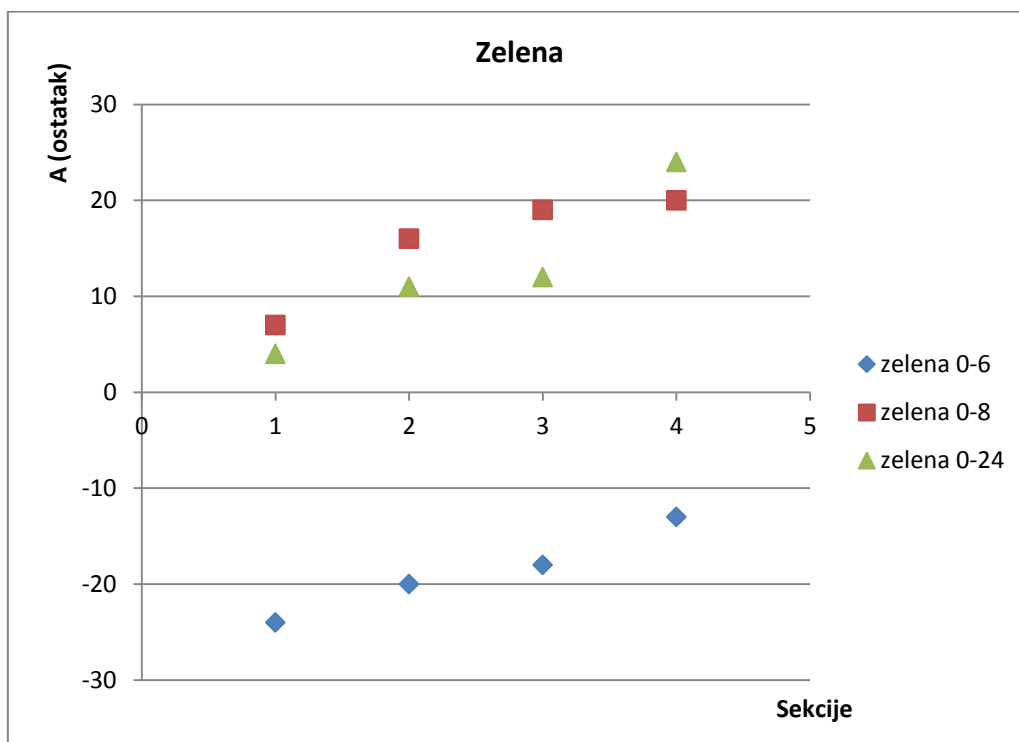
CRVENA BOJA	
Etalon 0-24	
Dio 1	23
Dio 2	22
Dio 3	37
Dio 4	43

Tablica 53. Vrijednosti A za renishaw izvor svjetlosti

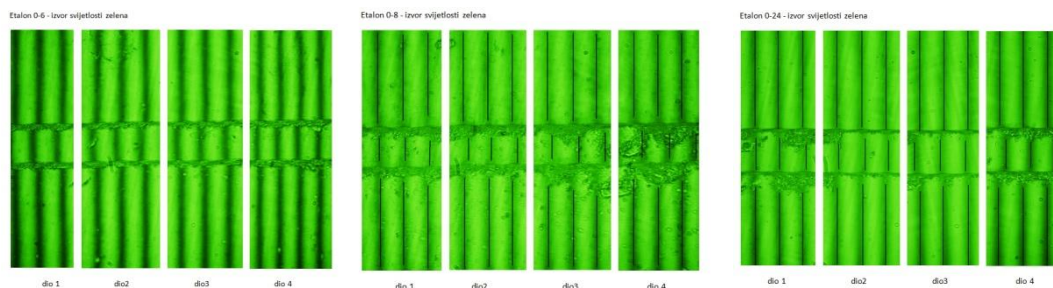
RENISHAW LASER		
Etalon 0-6		A
	Dio 1	-12
	Dio 2	2
	Dio 3	6
	Dio 4	3
RENISHAW LASER		
Etalon 0-8		A
	Dio 1	34
	Dio 2	36
	Dio 3	44
	Dio 4	44
RENISHAW LASER		
Etalon 0-24		A
	Dio 1	22
	Dio 2	24
	Dio 3	33
	Dio 4	41

Grafovi

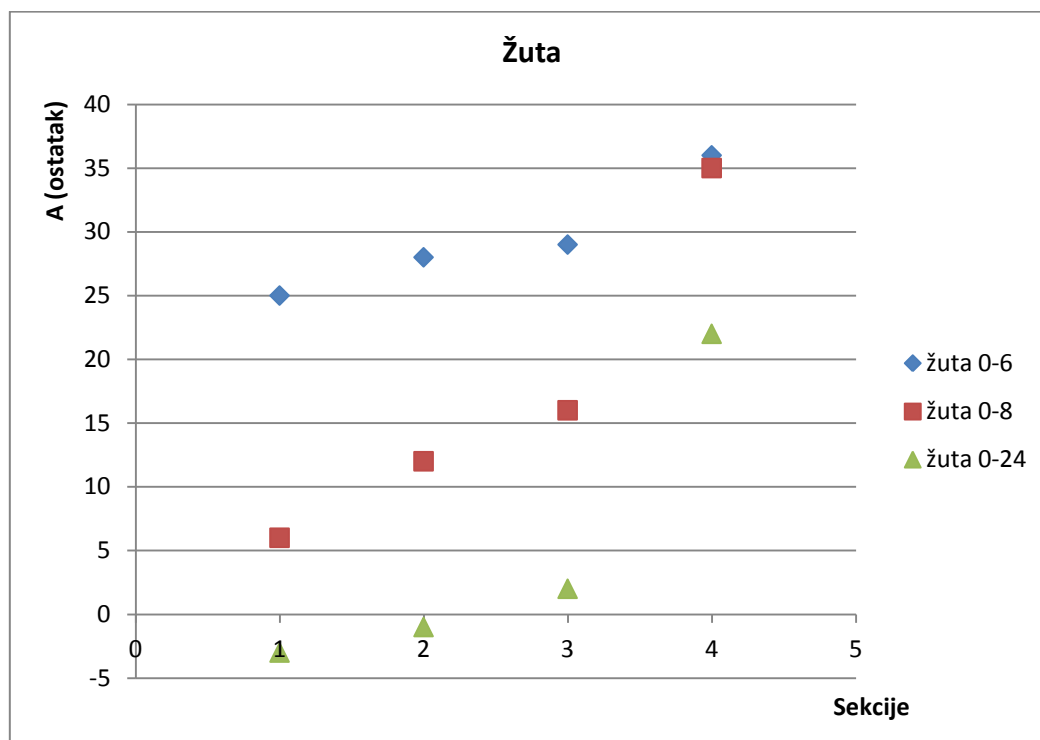
Temeljem rezultata iz tablica od 50. do 53., koristeći program Origin Pro, nacrtani su grafovi (slike od 79. do 86.). Grafovi predstavljaju rezultate mjerenja A po sekcijama s lijeva na desno. Analizom rezultata mjerenja veličine A utvrđeno je da prema sekcijama od lijeva na desno vrijednosti A u pravilu rastu. S obzirom da na nekim mjernim površinama postoje značajnija oštećenja, na tim mjestima može doći do greške u očitavanju vrijednosti A .



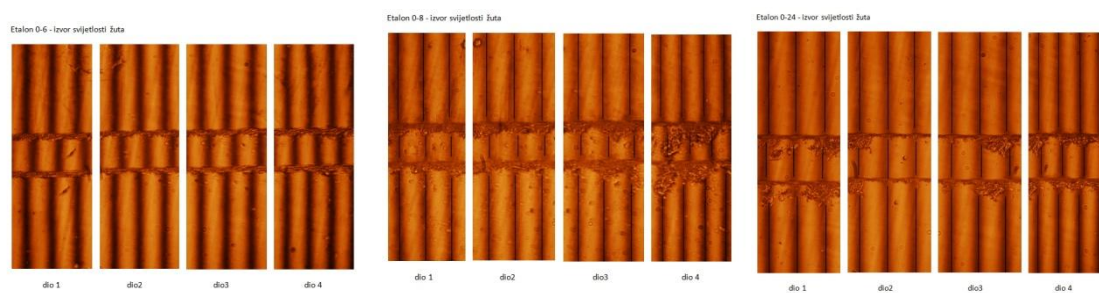
Slika 79. Graf zelena boja



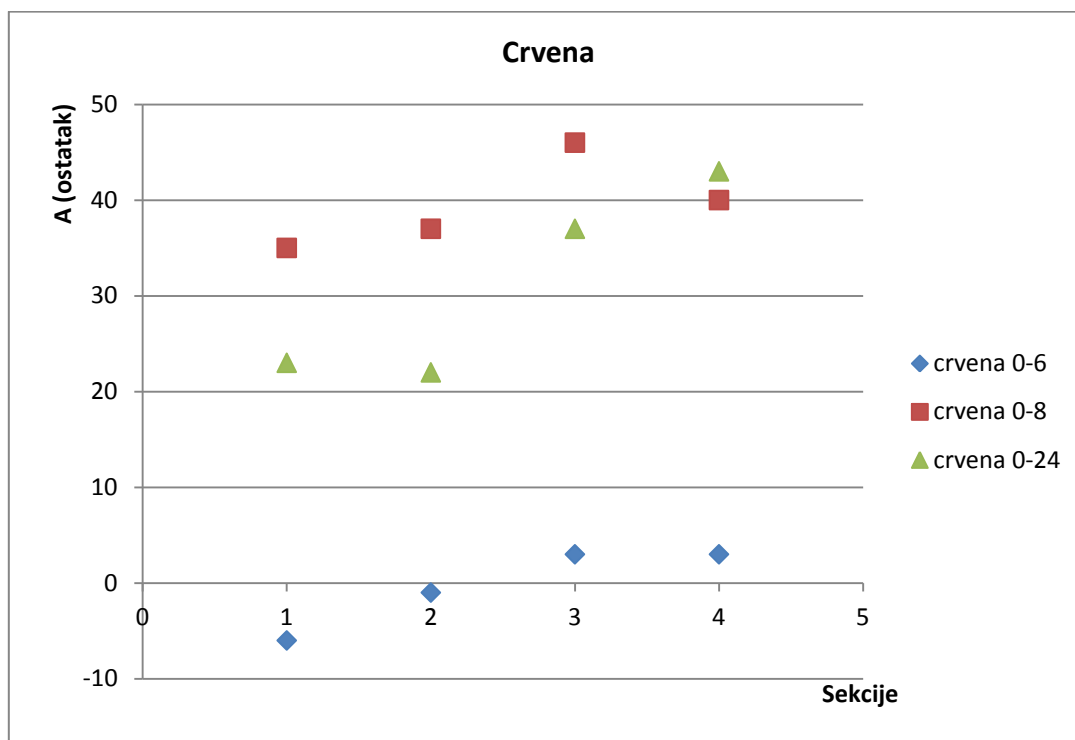
Slika 80. Prikaz interferograma po sekcijama - zelena boja



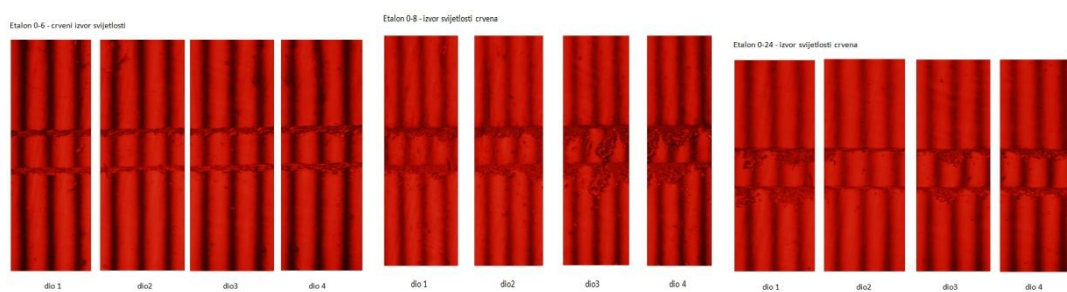
Slika 81. Graf žuta boja



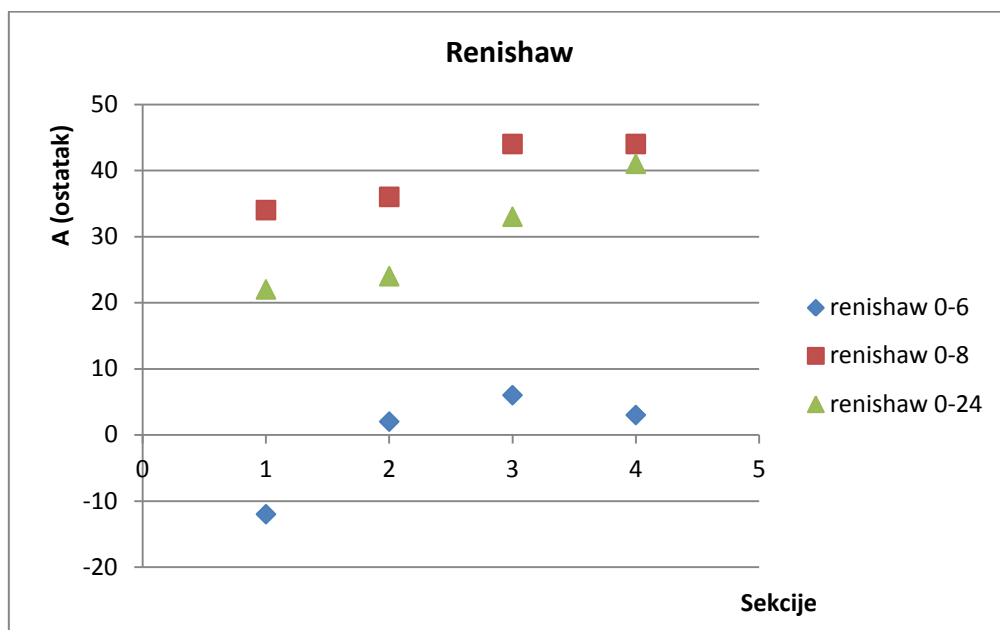
Slika 82. Prikaz interferograma po sekcijama - žuta boja



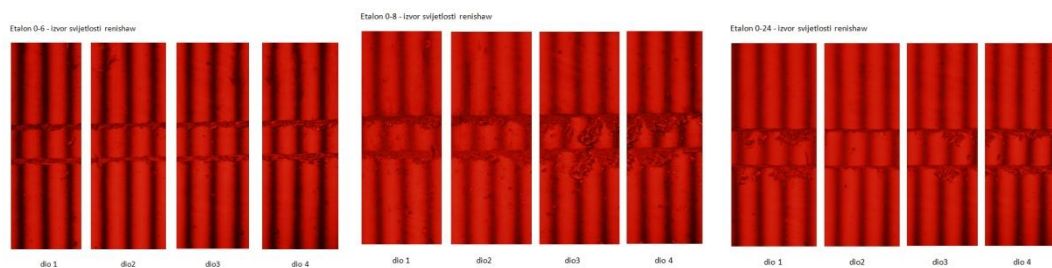
Slika 83. Graf crvena boja



Slika 84. Prikaz interferograma po sekcijama – crvena boja



Slika 85. Graf renishaw laser



Slika 86. Prikaz interferograma po sekcijama - renishaw laser

8. ZAKLJUČAK

Proračunom mjerne nesigurnosti u postupku mjerenja dubine brazde etalona na modificiranom interferencijskom mikroskopu ostvarena je očekivana razina mjerne nesigurnosti u iznosu od $U = 0,9 \text{ nm}$; $k = 2$; $P = 95 \%$.

Modifikacijom mikroskopa *Epival-Interphako* značajno je poboljšana točnost i preciznost mjernog uređaja. Modifikacija se sastojala od primjene CCD kamere *Olympus DP 70* s 12,5 megapiksela te zamjene originalnog izvora svjetlosti mikroskopa halogene lampe s jedno stabiliziranim helij-neon laserom.

Temeljem uočenih odstupanja od referentne vrijednosti koje se sa povećanjem nazivne dubine brazde linearno uvećavaju, utvrđen je faktor korekcije d_{kor} za različite izvore svjetlosti, koji predstavlja koeficijent smjera f_{kor} u jednadžbi pravca pomnožen sa izmjerenom dubinom brazde. Iz tablica se vidi da je nakon korigirane vrijednosti dubine brazde, razlika Δ_2 manja nego Δ_1 .

U daljnoj analizi pokazalo se da iz snimljenih interferograma za etalone 0-6, 0-8, 0-24 odnos A_1 , odnosno A_2 u brazdi nije uniforman. Analiza je pokazala da se rezultati mjerenja B u okolini ne razlikuju, no u brazdi su utvrđene veće vrijednosti B za sve izvore svjetla, kod sva 3 etalona. Očekivalo se da će odnos B i A , odnosno fazni pomak po cijelom interferogramu biti isti, ali to se nije tako pokazalo.

Kod analize interferograma po sekcijama pokazao se utjecaj porasta vrijednosti B u brazdi. Na nekim mjestim postoje oštećenja mjernih površina koja mogu utjecati na očitavanje B , odnosno ostatak A . Također, mogući je fizikalni uzrok zbog čega je došlo do povećanja vrijednosti u brazdi, a taj uzrok će se utvrditi daljnjom analizom.

9. LITERATURA

- [1] S. Mahović, Doprinos baždarenju etalona za podešavanje uređaja za ispitivanje hrapavosti tehničkih površina, Doktorska disertacija, FSB, Zagreb, 1985.
- [2] G. Baršić, Razvoj etalona za područje nanomjeriteljstva, Doktorska disertacija, FSB, Zagreb, 2011.
- [3] Jenaer Rundschau, Zur Praktischen Durchführung interferenzmikroskopischer Messungen an Oberflächen, insbesondere in der Halbleitertechnik und Mikroelektronik, DDR, 1974
- [4] Interferenzmikroskopie Prinzip und Anwendungen, DDR, 1974
- [5] JCGM 100:2008, Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)

10. PRILOZI

Prilog I. Očitani rezultati analize interferograma po sekcijama za etalone 0-6, 0-8 i 0-24 iz programa za analizu slike.

Edmund Optics, 5-Color Tunable Helium-Neon Laser - Crvena boja

Crvena boja 0-6 sekcije dio 1

okolina	Etalon 0-6	Crvena - dio 1
	B	107,26
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	9,032756
brazda	Etalon 0-6	Crvena - dio 1
	Novi B	107,04
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	5,878354
	A1	6
	A2	101
	StdDev A1	2,489016
	StdDev A2	2,489016
okolina	Etalon 0-6	Crvena - dio 1
	Novi B	107,17
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	5,878354
	A1	8
	A2	99
	StdDev A1	2,598077
	StdDev A2	2,598077

Crvena boja 0-6 sekcije dio 2

okolina	Etalon 0-6	Crvena - dio 2
	B	106,78
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	1,52868
brazda	Etalon 0-6	Crvena - dio 2
	Novi B	107,73
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	1,435241
	A1	1
	A2	106
	StdDev A1	0,3323402
	StdDev A2	0,3323402
okolina	Etalon 0-6	Crvena - dio 2
	Novi B	107,5
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	1,171956
	A1	2
	A2	106
	StdDev A1	1,378873
	StdDev A2	1,378873

Crvena boja 0-6 sekcije dio 3

okolina	Etalon 0-6	Crvena - dio 3
	B	106,02
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	0,3883283
brazda	Etalon 0-6	Crvena - dio 3
	Novi B	108,17
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	2,519805
	A1	3
	A2	102
	StdDev A1	0
	StdDev A2	0
okolina	Etalon 0-6	Crvena - dio 3
	Novi B	107,8
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	2,095696
	A1	4
	A2	106
	StdDev A1	2,548222
	StdDev A2	2,548222

Crvena boja 0-6 sekcije dio 4

okolina	Etalon 0-6	Crvena - dio 4
	B	101,5
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	7,679795
brazda	Etalon 0-6	Crvena - dio 4
	Novi B	104,89
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	6,091118
	A1	3
	A2	99
	StdDev A1	0,3323402
	StdDev A2	0,3323402
okolina	Etalon 0-6	Crvena - dio 4
	Novi B	105,59
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	4,841804
	A1	5
	A2	100
	StdDev A1	2,762783
	StdDev A2	2,762783

Crvena boja 0-8 sekcije dio 1

okolina	Etalon 0-8	Crvena - dio 1
	B	107,27
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	2,029107
brazda	Etalon 0-8	Crvena - dio 1
	Novi B	108,27
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	1,984526
	A1	35
	A2	72
	StdDev A1	1,463711
	StdDev A2	1,463711
okolina	Etalon 0-8	Crvena - dio 1
	Novi B	108,03
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	1,463711
	A1	26
	A2	81
	StdDev A1	13,70698
	StdDev A2	13,70698

Crvena boja 0-6 sekcije dio 2

okolina	Etalon 0-8	Crvena - dio 2
	B	107,86
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	3,038544
brazda	Etalon 0-8	Crvena - dio 2
	Novi B	108,09
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	1,782672
	A1	37
	A2	70
	StdDev A1	1,986971
	StdDev A2	1,986971
okolina	Etalon 0-8	Crvena - dio 2
	Novi B	107,63
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	1,990756
	A1	30
	A2	78
	StdDev A1	13,84142
	StdDev A2	13,84142

Crvena boja 0-8 sekcije dio 3

okolina	Etalon 0-8	Crvena - dio 3
	B	105,54
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	12,49989
brazda	Etalon 0-8	Crvena - dio 3
	Novi B	101,35
	Broj uzoraka n	5
	StdDev B	11,43498
	A1	46
	A2	59
	StdDev A1	3,429467
	StdDev A2	3,429467
okolina	Etalon 0-8	Crvena - dio 3
	Novi B	103,25
	Broj uzoraka n	8
	StdDev B	11,43498
	A1	33
	A2	67
	StdDev A1	21,18554
	StdDev A2	21,18554

Crvena boja 0-8 sekcije dio 4

okolina	Etalon 0-8	Crvena - dio 4
	B	105,15
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	9,98387
brazda	Etalon 0-8	Crvena - dio 4
	Novi B	106,5
	Broj uzoraka n	5
	StdDev B	7,43863
	A1	40
	A2	66
	StdDev A1	2,12132
	StdDev A2	2,12132
okolina	Etalon 0-8	Crvena - dio 4
	Novi B	106,35
	Broj uzoraka n	8
	StdDev B	5,282073
	A1	32
	A2	72
	StdDev A1	21,01735
	StdDev A2	21,01735

Crvena boja 0-24 sekcije dio 1

okolina	Etalon 0-24	Crvena - dio 1
	B	107,27
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	2,029107
brazda	Etalon 0-24	Crvena - dio 1
	Novi B	108,27
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	1,984526
	A1	35
	A2	72
	StdDev A1	1,463711
	StdDev A2	1,463711
okolina	Etalon 0-24	Crvena - dio 1
	Novi B	108,03
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	1,463711
	A1	26
	A2	81
	StdDev A1	13,70698
	StdDev A2	13,70698

Crvena boja 0-24 sekcije dio 2

okolina	Etalon 0-24	Crvena - dio 2
	B	107,86
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	3,038544
brazda	Etalon 0-24	Crvena - dio 2
	Novi B	108,09
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	1,782672
	A1	37
	A2	70
	StdDev A1	1,986971
	StdDev A2	1,986971
okolina	Etalon 0-24	Crvena - dio 2
	Novi B	107,63
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	1,990756
	A1	30
	A2	78
	StdDev A1	13,84142
	StdDev A2	13,84142

Crvena boja 0-24 sekcije dio 3

okolina	Etalon 0-24	Crvena - dio 3
	B	105,54
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	12,49989
brazda	Etalon 0-24	Crvena - dio 3
	Novi B	101,35
	Broj uzoraka n	5
	StdDev B	11,43498
	A1	46
	A2	59
	StdDev A1	3,429467
	StdDev A2	3,429467
okolina	Etalon 0-24	Crvena - dio 3
	Novi B	103,25
	Broj uzoraka n	8
	StdDev B	11,43498
	A1	33
	A2	67
	StdDev A1	21,18554
	StdDev A2	21,18554

Crvena boja 0-24 sekcije dio 4

okolina	Etalon 0-24	Crvena - dio 4
	B	105,15
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	9,98387
brazda	Etalon 0-24	Crvena - dio 4
	Novi B	106,5
	Broj uzoraka n	5
	StdDev B	7,43863
	A1	40
	A2	66
	StdDev A1	2,12132
	StdDev A2	2,12132
okolina	Etalon 0-24	Crvena - dio 4
	Novi B	106,35
	Broj uzoraka n	8
	StdDev B	5,282073
	A1	32
	A2	72
	StdDev A1	21,01735
	StdDev A2	21,01735

RENISHAW LASER

Renishaw laser 0-6 sekcije dio 1

okolina	Etalon 0-6	renishaw - dio 1
	B	114,41
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	13,42735
brazda	Etalon 0-6	renishaw - dio 1
	Novi B	111,88
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	8,574014
	A1	12
	A2	103
	StdDev A1	8,386287
	StdDev A2	8,386287
okolina	Etalon 0-6	renishaw - dio 1
	Novi B	110,24
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	7,124928
	A1	10
	A2	102
	StdDev A1	5,422093
	StdDev A2	5,422093

Renishaw laser 0-6 sekcije dio 2

okolina	Etalon 0-6	renishaw - dio 2
	B	107,55
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	0,7755937
brazda	Etalon 0-6	renishaw - dio 2
	Novi B	107,78
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	0,7136716
	A1	2
	A2	105
	StdDev A1	0,3606245
	StdDev A2	0,3606245
okolina	Etalon 0-6	renishaw - dio 2
	Novi B	107,7
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	0,567066
	A1	2
	A2	106
	StdDev A1	0,2720753
	StdDev A2	0,2720753

Renishaw laser 0-6 sekcije dio 3

okolina	Etalon 0-6	renishaw - dio 3
	B	108,03
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	0,08126
brazda	Etalon 0-6	renishaw - dio 3
	Novi B	108,08
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	1,508609
	A1	1
	A2	107
	StdDev A1	0
	StdDev A2	0
okolina	Etalon 0-6	renishaw - dio 3
	Novi B	108,28
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	1,521282
	A1	3
	A2	106
	StdDev A1	2,2401414
	StdDev A2	2,2401414

Renishaw laser 0-6 sekcije dio 4

okolina	Etalon 0-6	renishaw - dio 4
	B	106,39
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	1,484281
brazda	Etalon 0-6	renishaw - dio 4
	Novi B	107,26
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	1,517019
	A1	3
	A2	103
	StdDev A1	1,117229
	StdDev A2	1,117229
okolina	Etalon 0-6	renishaw - dio 4
	Novi B	107,3
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	1,274681
	A1	5
	A2	102
	StdDev A1	2,177864
	StdDev A2	2,177864

Renishaw laser 0-8 sekcije dio 1

okolina	Etalon 0-8	renishaw - dio 1
	B	107,12
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	0,04379
brazda	Etalon 0-8	renishaw - dio 1
	Novi B	107,79
	Broj uzoraka n	5
	StdDev B	1,149198
	A1	34
	A2	73
	StdDev A1	1,385929
	StdDev A2	1,385929
okolina	Etalon 0-8	renishaw - dio 1
	Novi B	107,23
	Broj uzoraka n	8
	StdDev B	1,15516
	A1	26
	A2	81
	StdDev A1	11,2354
	StdDev A2	11,2354

Renishaw laser 0-8 sekcije dio 2

okolina	Etalon 0-8	renishaw - dio 2
	B	107,3
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	0,1846207
brazda	Etalon 0-8	renishaw - dio 2
	Novi B	107,68
	Broj uzoraka n	5
	StdDev B	0,6629575
	A1	36
	A2	72
	StdDev A1	0,890956
	StdDev A2	0,890956
okolina	Etalon 0-8	renishaw - dio 2
	Novi B	107,31
	Broj uzoraka n	8
	StdDev B	0,6912792
	A1	27
	A2	81
	StdDev A1	14,95378
	StdDev A2	14,95378

Renishaw laser 0-8 sekcije dio 3

okolina	Etalon 0-8	renishaw - dio 3
	B	105,55
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	3,336811
brazda	Etalon 0-8	renishaw - dio 3
	Novi B	99,64
	Broj uzoraka n	5
	StdDev B	10,50532
	A1	44
	A2	62
	StdDev A1	10,05506
	StdDev A2	10,05506
okolina	Etalon 0-8	renishaw - dio 3
	Novi B	102,56
	Broj uzoraka n	8
	StdDev B	8,448079
	A1	30
	A2	70
	StdDev A1	21,09365
	StdDev A2	21,09365

Renishaw laser 0-8 sekcije dio 4

okolina	Etalon 0-8	renishaw - dio 4
	B	103,57
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	3,455184
brazda	Etalon 0-8	renishaw - dio 4
	Novi B	104,73
	Broj uzoraka n	5
	StdDev B	3,167123
	A1	44
	A2	59
	StdDev A1	4,193143
	StdDev A2	4,193143
okolina	Etalon 0-8	renishaw - dio 4
	Novi B	105,14
	Broj uzoraka n	8
	StdDev B	2,436674
	A1	35
	A2	70
	StdDev A1	21,72989
	StdDev A2	21,72989

Renishaw laser 0-24 sekcije dio 1

okolina	Etalon 0-24	renishaw - dio 1
	B	108,98
	Broj uzoraka n	2
	StdDev B	0
brazda	Etalon 0-24	renishaw - dio 1
	Novi B	109,47
	Broj uzoraka n	4
	StdDev B	0,7007841
	A1	22
	A2	87
	StdDev A1	0
	StdDev A2	0
okolina	Etalon 0-24	renishaw - dio 1
	Novi B	109,5
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	0,498514
	A1	22
	A2	87
	StdDev A1	0,601041
	StdDev A2	0,601041

Renishaw laser 0-24 sekcije dio 2

okolina	Etalon 0-24	renishaw - dio 2
	B	105,14
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	3,552063
brazda	Etalon 0-24	renishaw - dio 2
	Novi B	107,25
	Broj uzoraka n	5
	StdDev B	4,427341
	A1	24
	A2	81
	StdDev A1	2,694077
	StdDev A2	2,694077
okolina	Etalon 0-24	renishaw - dio 2
	Novi B	107,29
	Broj uzoraka n	8
	StdDev B	3,13908
	A1	26
	A2	82
	StdDev A1	3,379561
	StdDev A2	3,379561

Renishaw laser 0-24 sekcije dio 3

okolina	Etalon 0-24	renishaw - dio 3
	B	105,83
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	0,28286
brazda	Etalon 0-24	renishaw - dio 3
	Novi B	107,29
	Broj uzoraka n	5
	StdDev B	2,543416
	A1	33
	A2	73
	StdDev A1	3,24562
	StdDev A2	3,24562
okolina	Etalon 0-24	renishaw - dio 3
	Novi B	107,1
	Broj uzoraka n	8
	StdDev B	1,852185
	A1	35
	A2	73
	StdDev A1	4,206032
	StdDev A2	4,206032

Renishaw laser 0-24 sekcije dio 4

okolina	Etalon 0-24	renishaw - dio 4
	B	100,83
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	8,425097
brazda	Etalon 0-24	renishaw - dio 4
	Novi B	105,19
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	7,70383
	A1	41
	A2	60
	StdDev A1	4,737616
	StdDev A2	4,737616
okolina	Etalon 0-24	renishaw - dio 4
	Novi B	105,62
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	6,063266
	A1	43
	A2	62
	StdDev A1	3,995726
	StdDev A2	3,995726

Edmund Optics, 5-Color Tunable Helium-Neon Laser - zelena boja

Zelena boja 0-6 sekcije dio 1

okolina	Etalon 0-6	zelena - dio 1
	B	90,2
	Broj uzoraka n	2
	StdDev B	0
brazda	Etalon 0-6	zelena - dio 1
	Novi B	91,38
	Broj uzoraka n	4
	StdDev B	1,661231
	A1	24
	A2	67
	StdDev A1	0
	StdDev A2	0
okolina	Etalon 0-6	zelena - dio 1
	Novi B	91,14
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	1,245071
	A1	23
	A2	68
	StdDev A1	0,0989
	StdDev A2	0,0989

Zelena boja 0-6 sekcije dio 2

okolina	Etalon 0-6	zelena - dio 2
	B	91,33
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	0,6146291
brazda	Etalon 0-6	zelena - dio 2
	Novi B	91,13
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	2,177312
	A1	20
	A2	72
	StdDev A1	1,866761
	StdDev A2	1,866761
okolina	Etalon 0-6	zelena - dio 2
	Novi B	91,2
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	1,695633
	A1	19
	A2	72
	StdDev A1	1,65024
	StdDev A2	1,65024

Zelena boja 0-6 sekcije dio 3

okolina	Etalon 0-6	zelena - dio 3
	B	91,83
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	0,2495633
brazda	Etalon 0-6	zelena - dio 3
	Novi B	92,07
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	1,981036
	A1	18
	A2	74
	StdDev A1	1,902118
	StdDev A2	1,902118
okolina	Etalon 0-6	zelena - dio 3
	Novi B	91,8
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	1,644299
	A1	18
	A2	74
	StdDev A1	1,182325
	StdDev A2	1,182325

Zelena boja 0-6 sekcije dio 4

okolina	Etalon 0-6	zelena - dio 4
	B	90,93
	Broj uzoraka n	4
	StdDev B	2,132115
brazda	Etalon 0-6	zelena - dio 4
	Novi B	91,75
	Broj uzoraka n	7
	StdDev B	1,941194
	A1	13
	A2	77
	StdDev A1	2,66
	StdDev A2	2,66
okolina	Etalon 0-6	zelena - dio 4
	Novi B	91,73
	Broj uzoraka n	11
	StdDev B	1,477716
	A1	13
	A2	79
	StdDev A1	1,477716
	StdDev A2	1,477716

Zelena boja 0-8 sekcije dio 1

okolina	Etalon 0-8	zelena - dio 1
	B	94,73
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	3,321749
brazda	Etalon 0-8	zelena - dio 1
	Novi B	94,18
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	2,392107
	A1	7
	A2	88
	StdDev A1	3,549676
	StdDev A2	3,549676
okolina	Etalon 0-8	zelena - dio 1
	Novi B	92,69
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	2,97176
	A1	5
	A2	89
	StdDev A1	3,788379
	StdDev A2	3,788379

Zelena boja 0-8 sekcije dio 2

okolina	Etalon 0-8	zelena - dio 2
	B	91,49
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	0,7512901
brazda	Etalon 0-8	zelena - dio 2
	Novi B	91,43
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	5,214022
	A1	16
	A2	75
	StdDev A1	4,96389
	StdDev A2	4,96389
okolina	Etalon 0-8	zelena - dio 2
	Novi B	90,78
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	4,449759
	A1	13
	A2	79
	StdDev A1	6,534839
	StdDev A2	6,534839

Zelena boja 0-8 sekcije dio 3

okolina	Etalon 0-8	zelena - dio 3
	B	90,7
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	7,495336
brazda	Etalon 0-8	zelena - dio 3
	Novi B	94,42
	Broj uzoraka n	5
	StdDev B	6,304679
	A1	19
	A2	72
	StdDev A1	2,899138
	StdDev A2	0,4384068
okolina	Etalon 0-8	zelena - dio 3
	Novi B	92,85
	Broj uzoraka n	8
	StdDev B	5,768973
	A1	18
	A2	76
	StdDev A1	9,424403
	StdDev A2	9,424403

Zelena boja 0-8 sekcije dio 4

okolina	Etalon 0-8	zelena - dio 4
	B	90,67
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	7,535743
brazda	Etalon 0-8	zelena - dio 4
	Novi B	94,61
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	6,979576
	A1	20
	A2	71
	StdDev A1	4,412346
	StdDev A2	4,412346
okolina	Etalon 0-8	zelena - dio 4
	Novi B	92,96
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	6,290626
	A1	20
	A2	75
	StdDev A1	10,00999
	StdDev A2	10,00999

Zelena boja 0-24 sekcije dio 1

okolina	Etalon 0-24	zelena - dio 1
	B	91,41
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	2,925663
brazda	Etalon 0-24	zelena - dio 1
	Novi B	94,17
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	4,638619
	A1	4
	A2	87
	StdDev A1	2,84964
	StdDev A2	2,84964
okolina	Etalon 0-24	zelena - dio 1
	Novi B	93,05
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	4,022773
	A1	5
	A2	88
	StdDev A1	4,294116
	StdDev A2	4,294116

Zelena boja 0-24 sekcije dio 2

okolina	Etalon 0-24	zelena - dio 2
	B	91,03
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	3,582393
brazda	Etalon 0-24	zelena - dio 2
	Novi B	94,14
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	5,507739
	A1	11
	A2	84
	StdDev A1	2,77893
	StdDev A2	2,77893
okolina	Etalon 0-24	zelena - dio 2
	Novi B	93,26
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	5,671144
	A1	9
	A2	86
	StdDev A1	3,586498
	StdDev A2	3,586498

Zelena boja 0-24 sekcije dio 3

okolina	Etalon 0-24	zelena - dio 3
	B	90,75
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	1,06066
brazda	Etalon 0-24	zelena - dio 3
	Novi B	93,38
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	3,198307
	A1	12
	A2	79
	StdDev A1	3,535534
	StdDev A2	3,535534
okolina	Etalon 0-24	zelena - dio 3
	Novi B	92,21
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	4,673174
	A1	14
	A2	79
	StdDev A1	6,385008
	StdDev A2	6,385008

Zelena boja 0-24 sekcije dio 4

okolina	Etalon 0-24	zelena - dio 4
	B	87,43
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	5,220361
brazda	Etalon 0-24	zelena - dio 4
	Novi B	90,42
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	4,627215
	A1	24
	A2	63
	StdDev A1	2,156677
	StdDev A2	2,156677
okolina	Etalon 0-24	zelena - dio 4
	Novi B	90,97
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	3,949639
	A1	27
	A2	63
	StdDev A1	3,828197
	StdDev A2	3,828197

Edmund Optics, 5-Color Tunable Helium-Neon Laser - žuta boja

Žuta boja 0-6 sekcije dio 1

okolina	Etalon 0-6	žuta - dio 1
	B	100,65
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	1,644647
brazda	Etalon 0-6	žuta - dio 1
	Novi B	100,48
	Broj uzoraka n	5
	StdDev B	1,203181
	A1	25
	A2	76
	StdDev A1	0,445478
	StdDev A2	0,445478
okolina	Etalon 0-6	žuta - dio 1
	Novi B	100,53
	Broj uzoraka n	1,082159
	StdDev B	8
	A1	26
	A2	75
	StdDev A1	1,401297
	StdDev A2	1,401297

Žuta boja 0-6 sekcije dio 2

okolina	Etalon 0-6	žuta - dio 2
	B	100,76
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	0,1674815
brazda	Etalon 0-6	žuta - dio 2
	Novi B	100,85
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	0,972765
	A1	28
	A2	72
	StdDev A1	0,8768122
	StdDev A2	0,8768122
okolina	Etalon 0-6	žuta - dio 2
	Novi B	100,87
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	0,7629237
	A1	29
	A2	72
	StdDev A1	1,337273
	StdDev A2	1,337273

Žuta boja 0-6 sekcije dio 3

okolina	Etalon 0-6	žuta - dio 3
	B	100
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	1,709816
brazda	Etalon 0-6	žuta - dio 3
	Novi B	101,14
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	1,641864
	A1	29
	A2	71
	StdDev A1	0,6576082
	StdDev A2	0,6576082
okolina	Etalon 0-6	žuta - dio 3
	Novi B	100,6
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	1,55919
	A1	31
	A2	70
	StdDev A1	2,891487
	StdDev A2	2,891487

Žuta boja 0-6 sekcije dio 4

okolina	Etalon 0-6	žuta - dio 4
	B	99,41
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	8,189274
brazda	Etalon 0-6	žuta - dio 4
	Novi B	100,95
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	5,064427
	A1	36
	A2	63
	StdDev A1	6,590236
	StdDev A2	6,590236
okolina	Etalon 0-6	žuta - dio 4
	Novi B	100,75
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	3,946562
	A1	37
	A2	64
	StdDev A1	4,013478
	StdDev A2	4,013478

Žuta boja 0-8 sekcije dio 1

okolina	Etalon 0-8	žuta - dio 1
	B	103,01
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	5,231798
brazda	Etalon 0-8	žuta - dio 1
	Novi B	102,92
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	4,022001
	A1	8
	A2	95
	StdDev A1	4,787113
	StdDev A2	4,787113
okolina	Etalon 0-8	žuta - dio 1
	Novi B	102,46
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	3,340173
	A1	6
	A2	99
	StdDev A1	4,030644
	StdDev A2	4,030644

Žuta boja 0-8 sekcije dio 2

okolina	Etalon 0-8	žuta - dio 2
	B	104,83
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	2,1854
brazda	Etalon 0-8	žuta - dio 2
	Novi B	105,41
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	3,196505
	A1	12
	A2	93
	StdDev A1	4,391133
	StdDev A2	4,391133
okolina	Etalon 0-8	žuta - dio 2
	Novi B	103,99
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	3,567751
	A1	11
	A2	94
	StdDev A1	2,892862
	StdDev A2	2,892862

Žutaboja 0-8 sekcije dio 3

okolina	Etalon 0-8	žuta - dio 3
	B	97,56
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	5,784862
brazda	Etalon 0-8	žuta - dio 3
	Novi B	99,15
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	4,649595
	A1	16
	A2	81
	StdDev A1	7,445834
	StdDev A2	7,445834
okolina	Etalon 0-8	žuta - dio 3
	Novi B	98,89
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	3,643463
	A1	16
	A2	83
	StdDev A1	4,344859
	StdDev A2	4,344859

Žuta boja 0-8 sekcije dio 4

okolina	Etalon 0-8	žuta - dio 4
	B	98,1
	Broj uzoraka n	4
	StdDev B	4,171841
brazda	Etalon 0-8	žuta - dio 4
	Novi B	100,2
	Broj uzoraka n	7
	StdDev B	6,679893
	A1	35
	A2	64
	StdDev A1	5,953019
	StdDev A2	5,953019
okolina	Etalon 0-8	žuta - dio 4
	Novi B	100,21
	Broj uzoraka n	10
	StdDev B	5,472107
	A1	29
	A2	72
	StdDev A1	12,26836
	StdDev A2	12,26836

Žuta boja 0-24 sekcije dio 1

okolina	Etalon 0-24	žuta - dio 1
	B	99,74
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	0,09221
brazda	Etalon 0-24	žuta - dio 1
	Novi B	102,2
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	4,402719
	A1	3
	A2	96
	StdDev A1	0,5303301
	StdDev A2	0,5303301
okolina	Etalon 0-24	žuta - dio 1
	Novi B	102,31
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	4,1525
	A1	6
	A2	96
	StdDev A1	4,934197
	StdDev A2	4,934197

Žutaboja 0-24 sekcije dio 2

okolina	Etalon 0-24	žuta - dio 2
	B	99,02
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	8,429461
brazda	Etalon 0-24	žuta - dio 2
	Novi B	101,91
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	6,19444
	A1	1
	A2	92
	StdDev A1	0
	StdDev A2	0
okolina	Etalon 0-24	žuta - dio 2
	Novi B	102,3
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	4,84691
	A1	2
	A2	101
	StdDev A1	0,8099948
	StdDev A2	0,8099948

Žuta boja 0-24 sekcije dio 3

okolina	Etalon 0-24	žuta - dio 3
	B	98,04
	Broj uzoraka n	3
	StdDev B	2,599666
brazda	Etalon 0-24	žuta - dio 3
	Novi B	101,69
	Broj uzoraka n	6
	StdDev B	4,804739
	A1	2
	A2	94
	StdDev A1	0
	StdDev A2	0
okolina	Etalon 0-24	žuta - dio 3
	Novi B	100,56
	Broj uzoraka n	9
	StdDev B	4,118177
	A1	8
	A2	94
	StdDev A1	6,85251
	StdDev A2	6,85251

Žuta boja 0-24 sekcije dio 4

okolina	Etalon 0-24	žuta - dio 4
	B	96,03
	Broj uzoraka n	4
	StdDev B	4,82436
brazda	Etalon 0-24	žuta - dio 4
	Novi B	99,8
	Broj uzoraka n	8
	StdDev B	5,256141
	A1	22
	A2	74
	StdDev A1	6,237446
	StdDev A2	6,237446
okolina	Etalon 0-24	žuta - dio 4
	Novi B	99,8
	Broj uzoraka n	8
	StdDev B	5,256141
	A1	22
	A2	74
	StdDev A1	6,237446
	StdDev A2	6,237446